



Universidade de Aveiro

Departamento de Geociências

2015

**ENOQUE PAULO  
KATATA**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS CONDIÇÕES DE  
OPERAÇÃO NA QUALIDADE DO SINAL -  
PROCESSAMENTO DE DADOS DE REFLEXÃO  
SÍSMICA DE MULTICANAL**



**ENOQUE PAULO  
KATATA**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS CONDIÇÕES DE  
OPERAÇÃO NA QUALIDADE DO SINAL -  
PROCESSAMENTO DE DADOS DE REFLEXÃO  
SÍSMICA DE MULTICANAL**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Doutor Henrique Duarte, Director do Departamento de Geofísica Marinha da *GeoSurveys*, e do Professor Doutor Luís Menezes Pinheiro, Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais Dario Katata e Aurora Katata e aos meus irmãos Daniel, Julieta, Adriano, Alberto, Cecília e Abel

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina**  
Professor auxiliar do Departamento Geociências da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Luis Filipe Fuentefria de Menezes Pinheiro**  
Professor associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

**Doutor Henrique Duarte**  
Director do Departamento de Geofísica Marinha da GeoSurveys

**Prof. Doutor Rui Marque Moura**  
Professor auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto



## **agradecimentos**

Um grande obrigado aos meus orientadores, o Professor Luís Menezes e ao Doutor Henrique Duarte pela oportunidade que me concederam de poder trabalhar e aprender sob orientação de pessoas tão geniais, pela paciência e pela disponibilidade do tempo que me dispuseram.

Ao meu pai que será sempre uma fonte de inspiração e de energia para enfrentar cada dia com optimismo e um sorriso.

A minha mãe e aos meus irmão um obrigado não é suficiente.

Um obrigado a todas as pessoas espectaculares que tive o prazer de conhecer ao longo destes anos de faculdade, colegas de curso e de universidade, ao pessoal do Geociências, e um obrigado especial aos meus colegas da *GeoSurveys*.

Os meus amigos são os melhores amigos do mundo, muito obrigado.

Um grande agradecimento a cidade de Aveiro e a todos Aveirense, porque têm grande responsabilidade na evolução da pessoa em que me tornei.

## palavras-chave

Sísmica de reflexão, Multicanal, *UHS trim statics*, *GeoSurveys*, *Streamer*, *Geo-Source 200 LW*, *Geo-Spark 1KJ*, *Kingdom Suite*, *RadexPro*, Processamento de dados sísmicos, Sinal, Ruído, SEG-Y, *Pulau Tekong*.

## resumo

Através do processamento de dados sísmicos convertem-se registos de campo em secções sísmicas com significado geológico, que revelam informações e ajudam a delinear as camadas geológicas do subsolo e identificar estruturas soterradas. Portanto, a interpretação dos dados sísmicos só é boa se o processamento também o for.

Este trabalho é resultado de um estágio curricular na empresa de prospecção geofísica *GeoSurveys*, que consistiu principalmente em processar 18 linhas de dados de sísmica de reflexão multicanal de alta resolução adquiridas na ilha de Pulau Tekong em Singapura, que têm como finalidade investigação do solo da baía desta mesma ilha. Estes dados foram cedidos à *GeoSurveys* para fins académicos, caso em que se inclui esta dissertação. Para atingir os objectivos propostos que consistiam em avaliar o impacto das condições de operação na qualidade do sinal sísmico e interpretação das linhas, fez-se o processamento das linhas utilizando um fluxo processamento padrão utilizado na empresa, com recurso ao *software Radex Pro*. Este fluxo de processamento tem como mais-valia o método de correcções estáticas, o *UHS trim statics*, além das técnicas habituais utilizadas para melhorar a resolução das secções sísmicas como é o caso da desconvolução, a atenuação de ruído através do *stacking*, correcções de NMO, e migração, entre outras técnicas. A interpretação das linhas sísmicas processadas foi feita no *software Kingdom Suite (IHS)*, através da distinção da configuração interna dos reflectores em cada secção sísmica, estabelecendo deste modo as principais unidades sismo-estratigráficas e identificando as zonas de interface que delimitam os horizontes principais. Foi feito ainda um estudo geológico sumário da área de pesquisa e da evolução geodinâmica da região.

**keywords**

Seismic reflection, Multichannel, UHRS trim statics, GeoSurveys, Streamer, Geo-Source 200 LW, Geo-Spark 1KJ, RadexPro, Kingdom Suite, Seismic data processing, Signal, Noise, SEGY , Pulau Tekong.

**abstract**

Through seismic data processing, multichannel seismic field records are converted into seismic sections with geological meaning, which help to delineate the subsurface geological layers and identify any buried structures. Therefore, seismic data interpretation is only good as the processing is. This work is the result of a curricular internship in a geophysical prospecting company, GeoSurveys. It consisted mainly of processing 18 high resolution seismic reflection multichannel lines obtained on the Island of Pulau Tekong, in Singapore, which were acquired to investigate the bottom and subsurface sediments of the Island bay. This work was kindly released to GeoSurveys for academic purposes, as it is the case of this dissertation. To achieve the objectives of this thesis, which are to assess the impact of operating conditions and processing on the quality of seismic signal and interpretation of the seismic lines, 18 seismic lines were processed with a standard processing flow used in the company, on the Radex Pro software. This processing flow has as the advantage of using the statics corrections method UHRS trim statics, besides the usual techniques used to improve the seismic resolution sections, such as deconvolution and noise attenuation by stacking, NMO corrections, and migration, among other techniques. The interpretation was made using the Kingdom software, through the analysis of the reflections internal configuration, and the identification of the main stratigraphic units. A summary geological study of the area of research area, together with its geodynamic evolution was also made and is presented in this thesis.



# Conteúdos

Agradecimentos

Palavras-chave

Resumo

Keywords

Abstract

Conteúdos

Índice

Índice de figuras

Lista de equações

Lista de tabelas

Abreviações

Anexos

**Índice**

1.	Introdução	1
1.1.	Natureza e âmbito do trabalho	1
1.2.	A GeoSurveys – Consultores em Geofísica, Lda.	1
1.3.	Objectivos do trabalho desenvolvido	2
1.4.	Localização da área de estudo	3
1.5.	Dados utilizados	4
1.6.	Metodologia de trabalho	5
1.7.	Estrutura da dissertação	8
2.	Método de reflexão sísmica	9
2.1.	Princípio de funcionamento do método	10
2.2.	Eventos sísmicos	14
2.3.	Aquisição de dados	17
2.4.	Sistemas de aquisição de sísmica de reflexão multicanal	18
2.5.	Fontes sísmicas	19
2.6.	Receptores sísmicos	21
2.7.	Tipos de ruído	23
2.7.1.	Ruídos detectados pelo sistema de aquisição marítimo	24

2.7.2.	Métodos de atenuação de ruído	24
3.	Processamento de dados sísmicos	27
3.1.	Introdução ao sinal	27
3.2.	Filtragem do sinal	28
3.3.	Traço sísmico	29
3.4.	Fluxo padrão de processamento	30
4.	Projecto Singapura 2014 – Caso de estudo	34
4.1.	Enquadramento geológico	34
4.1.1.	Evolução geodinâmica da região sudeste Asiática	34
4.1.1.1.	Proterozóico (2500 - 545 Ma)	34
4.1.1.2.	Fanerozóico (545 - 0 Ma)	35
4.1.1.2.1.	Câmbrico – Ordovícico – Silúrico (545 - 410 Ma)	35
4.1.1.2.2.	Devónico (410 – 354 Ma)	35
4.1.1.2.3.	Carbónico (354 – 298 Ma)	36
4.1.1.2.4.	Pérmico Inferior (298 – 270 Ma)	38
4.1.1.2.5.	Pérmico Superior (270 – 252 Ma)	39
4.1.1.2.6.	Triásico (253 – 205 Ma)	39
4.1.1.2.7.	Jurássico (205 – 141 Ma)	40
4.1.1.2.8.	Cretácico (141 – 65 Ma)	41
4.1.1.2.9.	Cenozóico (65 – 0 Ma)	41
4.1.2.	Principais formações geológica de Singapura	41
4.2.	Aquisição, finalidade dos dados sísmicos e objectivos do processamento	43
4.3.	Aquisição dos dados	43
4.3.1.	Parâmetros de aquisição e identificação das linhas	45
4.3.2.	Navegação e posicionamento	45
4.4.	Controlo de qualidade	46
4.4.1.	Análise do sinal e do ruído	46
4.4.1.1.	Visualização dos dados em <i>shot</i> e <i>trace gather</i>	46
4.4.1.2.	Análise espectral	50
4.4.2.	Avaliação do impacto das condições de operação na qualidade do sinal multicanal	52
4.4.2.1.	Controlo da geometria de aquisição	52

4.4.2.2.	Rumo do navio – <i>Steering and line keeping</i>	54
4.4.2.3.	Velocidade do navio – <i>Speed through the water</i>	56
4.4.2.4.	Profundidade de reboque do equipamento	56
4.4.2.5.	Avaliação do equilíbrio da fonte e do <i>streamer</i>	57
4.4.2.6.	<i>Offsets</i> fonte-receptor	59
4.4.2.7.	Profundidade da área de aquisição	60
4.5.	Processamento de dados de sísmica multicanal de muito alta resolução – UHRS	60
4.5.1.	Sequência de processamento utilizada	60
4.5.2.	Descrição dos fluxos de processamento mais relevantes	63
4.5.2.1.	Atribuição da geometria	63
4.5.2.2.	Filtragem do ruído	64
4.5.2.3.	Desconvolução da assinatura Pré- <i>Stack</i>	65
4.5.2.4.	UHRS <i>trim statics</i>	66
4.5.2.5.	Atenuação de múltiplos – <i>Zero-Offset DeMultiple</i>	67
4.5.2.6.	Análise de velocidades – <i>Interactive Velocity Analysis</i> (IVA)	68
4.5.2.7.	Correcções de NMO e CDP <i>stack</i>	68
4.5.2.8.	Correcções das amplitudes	68
4.5.2.9.	Migração – <i>Post-Stack Stolt F-K Migration</i>	69
5.	Introdução à interpretação sísmo-estratigráfica	71
5.1.	Interpretação sísmo-estratigráfica das secções sísmicas em estudo	73
6.	Discussão de resultados	76
7.	Conclusões	81
	Referências bibliográficas	83
	Anexos	85
	Anexo 1	86
	Anexo 2	87
	Anexo 3	92
	Anexo 4	95

## Índice de figuras

Figura 1 - Áreas de atuação da <i>GeoSurveys</i> . .....	1
--	---

Figura 2 - Locais onde a <i>GeoSurveys</i> tem realizado trabalhos de prospecção geofísica. ....	2
Figura 3 - Localização geográfica da área de estudo, na ilha Pulau Tekong, em Singapura. ....	3
Figura 4 – Área de estudo e localização das linhas sísmicas adquiridas e processadas no âmbito deste trabalho. Projecção UTM, Zona 31N, Datum WGS84. ....	4
Figura 5 - <i>Shot gather</i> do registo de tiro 3700 ao 3705 e respectivo espectro de frequências, linha 031_Line1. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	5
Figura 6 - <i>Trace gather</i> do canal 6 da linha 031_Line1 e respectivo espectro de frequências. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	6
Figura 7 – Esquema do princípio de funcionamento do método de reflexão sísmica no mar. ....	11
Figura 8 – Reflexão e refração parcial da onda sísmica entre dois meios com diferentes propriedades geofísicas (modificado de Kearey <i>et al.</i> , 2002). ....	12
Figura 9 - Esquema representativo da primeira Zona de <i>Fresnel</i> . A energia retorna à fonte de todos os pontos de um reflector. A parte do reflector a partir da qual a energia retorna com metade do comprimento de onda da onda inicial reflectida é conhecida como Zona de Fresnel (modificado de Kearey <i>et al.</i> , 2002). ....	13
Figura 10 - a) Cálculo do raio da Zona de Fresnel utilizando o teorema de Pitágoras; b) Nomograma para determinar o raio da Zona de Fresnel. (modificado de Sheriff, 1996). .	14
Figura 11 – Eventos sísmicos num sismograma com traços registados por 24 geofones ao longo da superfície da terra em função do tempo, a verde a onda directa, a azul a refração e a vermelho a reflexão primária (modificado de Kearey <i>et al.</i> , 2002). ....	15
Figura 12 – Exemplos de alguns múltiplos que podem ocorrer (modificado de Kearey <i>et al.</i> , 2002). ....	15
Figura 13 – a) Geometria do percurso das ondas reflectidas através de uma camada horizontal; b) Curva do tempo em função da distância das ondas reflectidas em camadas horizontais, onde $\Delta T$ corresponde ao NMO (modificado de Kearey <i>et al.</i> , 2002). ....	16
Figura 14 - a) Geometria do percurso das ondas reflectidas através de uma camada com interface inclinada; b) Curva do tempo em função da distância das ondas reflectidas em camadas inclinadas, onde $\Delta T_d$ corresponde ao DMO – <i>Dip Moveout</i> (modificado de Kearey <i>et al.</i> , 2002). ....	17
Figura 15 – Esquema básico para a aquisição sísmica no mar (modificado de Kearey <i>et al.</i> , 2002). ....	19
Figura 16 - Espectro acústico das diferentes fontes (modificado de Kearey <i>et al.</i> , 2002)..	20
Figura 17 – Assinatura e espectro de frequências do <i>sparker Geo-Source 200</i> ; a) <i>sparker</i> que liberta 200 J de energia e b) <i>sparker</i> que liberta 800 J de energia. Escala vertical: Bars metro/divisão. ....	20
Figura 18 - Configuração de um <i>streamer</i> e seus componentes (De Gadallah and Fisher, 2009) .....	21
Figura 19 – a) Esquema de um hidrofone; b) Cancelamento da aceleração pelo hidrofone (modificado de Reynolds, 1997, <i>in</i> Ribeiro, 2011). ....	21



Figura 20 – a) Espectro de frequência com sinal; b) Espectro de frequência com ruído (modificado de Sheriff and Geldart, 1995).....	25
Figura 21 – Geometria de aquisição com cobertura de vários folds (CMP <i>staging</i> ) (modificado de <a href="http://glossary.oilfield.slb.com">http://glossary.oilfield.slb.com</a> ).....	25
Figura 22 - Sinal temporal contínuo. ....	27
Figura 23 - Amostragem e reconstrução do sinal analógico; a) sinal analógico contínuo; b) sinal digitalizado; c) sinal analógico reconstruído a partir do sinal amostrado (modificado de Gadallah and Fisher, 2009).....	27
Figura 24 – a) Onda sinusoidal com frequência inferior à frequência de <i>Nyquist</i> ; b) Onda sinusoidal com frequência superior a frequência de <i>Nyquist</i> (traço a cheio), caso em que fica sub-amostrada e as altas frequências aparecem como baixas frequências (modificado de Kearey <i>et al.</i> , 2002).....	28
Figura 25 – Traço sísmico resultado da convolução entre o <i>input</i> da fonte e a reflectividade do meio (modificado de Kearey <i>et al.</i> , 2002).....	29
Figura 26 – Fluxo padrão de processamento de dados sísmicos (modificado de Klemperer and Peddy, 1992 <i>in</i> Brown and Hawkesworth, 1992). ....	30
Figura 27 – a) Disposição dos traços por CMP <i>gather</i> ; tempos de chegada para todos os <i>offsets</i> correspondem ao mesmo ponto comum para cada reflector; b) CMP <i>gather</i> depois de feitas as correcções de NMO; c) <i>stack</i> dos traços com sinal resultante melhorado (modificado de Kruk, 2003). ....	32
Figura 28 – Correcções de NMO (modificado de Kruk, 2003).....	32
Figura 29 - Mapa geológico simplificado de Singapura (Zhou and Cai, 2011). ....	34
Figura 30 - Supercontinente <i>Rodinia</i> há 700 Ma e subsequente separação e formação do <i>Gondwana</i> há 500 Ma (modificado de Selley <i>et al.</i> , 2005). Os terrenos a partir dos quais se formou Singapura pertenciam ao <i>Gondwana</i> . ....	35
Figura 31 - Reconstrução da zona oeste do <i>Gondwana</i> para o Devónico Superior ao Carbónico Inferior, a mostrar posições do Este e Sul do bloco Asiático, distribuição da terra e do mar e a abertura do oceano <i>Palaeo Tethys</i> . Mostra ainda a distribuição do género de braquiópodes endémicos do Turnaciano <i>Chuiella</i> . NC, North China; SC, South China, T, Tarim; I, Indochina East Malaya West Sumatra; QI, Qiangtang; L. Lhasa; S, Sibumasu; WB, Western Cimmerian Continent (modificado de Selley <i>et al.</i> , 2005).....	36
Figura 32 - Reconstrução paleogeográfica da região do Thetys. (A) Carbónico Inferior, (B) Pérmico Inferior, (C) Pérmico Superior, (D) Triásico Superior, a mostrar a posição relativa do Oeste e Sudeste Asiático e a distribuição da terra e do mar. São mostradas também a distribuição dos conodontes resistentes às águas frias <i>Vjalovognathus</i> do Pérmico Inferior e os <i>Dicynodontes</i> do Pérmico Superior, na Indochina. SC, South China; T, Tarim, I, Indochina; EM, East Malaya; WS, West Sumatra; NC, North China; SI, Simao; S, Sibumasu; WB, West Burma; QI, Qiangtang; L, Lhasa; WC, Western Cimmerian Continent; KAZ, Kazakhstan; QS, Qamdo Simao; SG, Songpan Ganzi (modificado de Selley <i>et al.</i> , 2005). ..	37
Figura 33 - Distribuição das províncias da Flora do Pérmico Inferior. (A) Mapa geográfico actual; KL, Kunlun; QD, Qaidam; AL, Ala Shan; QT, Qiantang; L, Lhasa; QS, Qamdo Simao;	

SG, Songpan Ganzi; WB, West Bruma; SI, Simao; HT, Hainan Island Terranes; S, Semitau; SWB, South West Borneo. (B) Mapa paleogeográfico do Pérmico Inferior; T, Tarim; NC, North China; SC, South China; I, Indochina; EM, East Malaya; WS, West Sumatra; WC, Weste Cimmerian Continent; QI, Qiangtang; S, Sibumasu; L, Lhasa; WB, West Bruma (modificado de Selley <i>et al.</i> , 2005). .....	38
Figura 34 - As três províncias de granitoides do Sudeste da Ásia (de Selley <i>et al.</i> , 2005) ..	40
Figura 35 Fonte sísmica utilizada: Sparker Geo-Source 200 tips light weight. ....	43
Figura 36 - Plano de aquisição e diagrama dos <i>offsets</i> (sem escala) para a aquisição das linhas sísmicas. (a) Geometria 1 – geometria para as linhas adquiridas no dia 12 de Dezembro. (b) Geometria 2 - geometria para as linhas adquiridas nos dias 13 e 14 de Dezembro. ....	44
Figura 37 - Dados originais sem qualquer fase de processamento aplicada ( <i>raw data</i> ), do FFID 9270 ao FFID 9278 da linha 026_Line2; (a) <i>Raw data</i> e espectro de frequências (em decibéis) no 1º registo de tiro que corresponde a um registo apenas com ruído; (b) <i>Raw data</i> e espectro de frequências (em decibéis) que envolve sinal e o ruído. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	47
Figura 38 - Espectro de frequências (em decibéis) do sinal e do ruído do FFID 9270 ao FFID 9278 do <i>Raw data</i> da linha 026_Line2. ....	48
Figura 39 - Exemplo de alguns tipos de ruídos identificados; (a) <i>Burst noise</i> nos <i>shot gathers</i> do FFID 3300 ao FFID 3301 da linha 036_Line11 e respectivo espectro de frequências; (b) Ruído associado a actividades nas proximidades da zona de aquisição no <i>shot gather</i> do FFID 10944 ao FFID 10952 da linha 026_Line2 e respectivo espectro de frequências. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	49
Figura 40 - <i>Shot gathers</i> do FFID 9388 ao FFID 9393 da linha 026_Line2, onde se pode verificar o atraso de 0.1 milissegundos do traço sísmico do canal 24 em relação ao canal 25. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	50
Figura 41 - (a) <i>Wavelet</i> correspondente à assinatura da fonte ( <i>sparker</i> ) a disparar a 200J (escala vertical em milissegundos); (b) espectro de frequências da wavelet (em %), com frequência de amostragem de 10000 <i>Hertz</i> . ....	50
Figura 42 - Análise dos espectros de frequências para os canais 1, 12, 24, 36 e 48, para as linhas: (a) 027_Line3 adquirida com a geometria 1; (b) 037_Line1, adquirida com a geometria 2. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	51
Figura 43 – Exemplo do <i>ghost</i> do receptor observado nos dados. ....	53
Figura 44 - Linha 026_Line2; (a) <i>Crossplot</i> da linha com as coordenadas x e y dos CMPs, com a escala de cores a representar a variação do número do <i>fold</i> ; (b) Histograma do <i>TR_FOLD</i> em função da frequência, com a escala de cor a variar em função do número de traços por CMP; (c) Parte da secção sísmica da linha com o gráfico do número de <i>folds</i> em função do CDP, escala vertical em milissegundos (TWT). ....	55
Figura 45 - Atraso do <i>ghost</i> em relação ao pulso primário, onde o coeficiente de reflexão da superfície do mar é -1 dando origem a um sinal invertido e mudança de fase de 180 graus. ....	57

Figura 46 - - Secção sísmica em CMP <i>gather</i> com um gráfico das estáticas da fonte (SOU_STAT), onde se pode verificar o comportamento da fonte durante a aquisição da linha. Escala vertical em milissegundos (TWT).....	58
Figura 47 - Histograma das estáticas dos receptores em função da frequência que cada valor ocorre. Na escala de cores, as cores que tendem para a cor violeta corresponde os valores das estáticas em que o <i>streamer</i> esteve a afundar e cores próximo do vermelho, indicam ascensão do <i>streamer</i> à superfície .....	58
Figura 48 - Gráfico dos FFIDs em função do número de canais. Na escala de cores, a violeta representa os canais propensos a afundar e a vermelho canais que se movimentam para a superfície.....	59
Figura 49 - <i>Trace gather</i> onde é feito o controlo dos <i>offsets</i> determinados através da medição do tempo de chegada da onda directa nos canais 10, 12, 18 e 24, V-velocidade de propagação das ondas acústicas na água e t-tempo de chegada da onda directa ao receptor .....	59
Figura 50 - Fluxo de processamento as linhas sísmicas. As caixas de texto sem qualquer preenchimento representam passos de processamento e as caixas preenchidas a preto representam produtos de <i>output</i> .....	61
Figura 51 - Histograma de TR_FOLD em função da frequência do número de <i>folds</i> para a linha 037_XLine1. ....	63
Figura 52 – Registo de tiro do <i>raw data</i> antes da filtragem. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	64
Figura 53 – Registo de tiro do <i>Raw data</i> depois da filtragem. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	65
Figura 54 – Canal 6 da linha 037_Xline1, antes da desconvolução da assinatura da fonte. Escala vertical em milissegundos (TWT).....	65
Figura 55 - Canal 6 da linha 037_Xline1 depois da desconvolução da assinatura da fonte. Escala vertical em milissegundos (TWT).....	66
Figura 56 – Linha 032_Line7 antes de serem aplicadas as correcções estáticas. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	66
Figura 57 - Linha 032_Line7depois de serem aplicadas as correcções estáticas. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	66
Figura 58 – Linha 037_Xline1 antes da atenuação do múltiplo. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	67
Figura 59 - Linha 037_Xline1 depois da atenuação do múltiplo. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	67
Figura 60 - Análise interactiva de velocidades (a) CDP 200 e (b) CDP 700 para a linha 037_XLine1. As linhas cinzentas mostram as velocidades de intervalo. A figura ilustra uma penetração efectiva do sinal superior a 60 milissegundos. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	68
Figura 61 – Linha 037_Xline7 antes da migração. Escala vertical em milissegundos (TWT). ....	69

Figura 62 - Linha 037_Xline7 depois da migração. Escala vertical em milissegundos (TWT).	69
Figura 63 - Diferentes tipos de terminações de reflexões que definem os limites das sequências sísmo-estratigráficas (modificado de Mitchum <i>et al.</i> , 1977 <i>In</i> Kearey <i>et al.</i> , 2002).	71
Figura 64 - Algumas das configurações internas das reflexões para diferentes fácies sísmicas em sequências sedimentares que podem ser identificadas em secções sísmicas (modificado de Mitchum <i>et al.</i> , 1977 <i>in</i> Kearey <i>et al.</i> , 2002).	72
Figura 65 – <i>Base map</i> com as linhas sísmicas interpretadas assinaladas (ver Figura 6).	73
Figura 66 - Perfil sísmico da linha 037_XLine1 sem interpretação, Escala vertical em segundos (TWT).	74
Figura 67 – Perfil sísmico da linha 037_XLine1 para ilustrar os horizontes interpretados que correspondem às principais unidades estratigráficas. Escala vertical em segundos (TWT).	74
Figura 68 - - Perfil sísmico 037_XLine1 com estruturas sedimentares complexas e interpretadas entre o <i>Seabed</i> e o horizonte H2. Escala vertical em segundos (TWT).	75
Figura 69 - - Perfil sísmico 037_XLine1 com a totalidade dos horizontes interpretados. Escala vertical em segundos (TWT).	75
Figura 70 - Linha 037_XLine1 com igual <i>Mute Stretch Threshold</i> ; (a) do canal 1 ao canal 12; (b) do canal 1 ao canal 48. Escala vertical em TWT (milissegundos).	78
Figura 71 - Linha 039_XLine4_bis migrada, onde se podem ver as reverberações no lado esquerdo da secção sísmica e estruturas geológicas no lado direito da secção sísmica. Escala vertical em TWT (milissegundos).	79

## Lista de equações

Equação 1	10
Equação 2	10
Equação 3	11
Equação 4	12
Equação 5	12
Equação 6	14
Equação 7	17
Equação 8	17
Equação 9	26
Equação 10	28
Equação 11	28
Equação 12	54
Equação 13	54
Equação 14	54
Equação 15	60

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Geometria e parâmetros de aquisição de sísmica multicanal utilizados. ....	45
Tabela 2 - Parâmetros geodésicos WGS84, UTM Zona 48 Hemisfério Norte. ....	46
Tabela 3 - Parâmetros de processamento de dados de sísmica multicanal UHRS no software RadexPro. ....	62

## Lista de abreviações

BTSK – *Brute Stack*

CR – Coeficiente de Reflexão

CDP – *Common Depth Point*

CMP – *Common Mid Point*

DEMUL – Atenuação de Multiplos

DGPS – *Differential Global Positioning System*

DMO – *Dip Moveout*

FFID – *Field File Identification Number*

GRDF – *Geomarine Proprietary Binary Format*

Hz – *Hertz*

IVA – *Interactive Velocity Analysis*

LW – *Light Weight*

MIG – Migração

MS - Milissegundos

NMO – *Normal Moveout*

PPS – *Pulsed Power Supply*

QC – *Quality Control*

SEG-Y – *Society of Exploration Geophysicist convention for seismic data format*

SOU\_STAT – *Source Statics*

TR\_FOLD – *Trace Fold*

TWT – *Two - Way Time*

UHRS – *Ultra High Resolution Seismic*

Z – Impedância Acústica



## 1. Introdução

### 1.1. Natureza e âmbito do trabalho

A presente dissertação resulta de um estágio curricular realizado na empresa *GeoSurveys*-Consultores em geofísica, sediada em Aveiro, Portugal, por um período de seis meses, no âmbito da disciplina de Dissertação/Projeto/Estágio do 2º ano do curso de Mestrado em Engenharia Geológica (2º ciclo, segundo o modelo de Bolonha) da Universidade de Aveiro, sob orientação do Doutor Henrique Duarte, Director do Departamento de Geofísica Marinha da *GeoSurveys*, e do Professor Luís Menezes Pinheiro do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

### 1.2. A *GeoSurveys* – Consultores em Geofísica, Lda.

A *GeoSurveys* – Consultores em Geofísica, Lda., formou-se em 1999, a partir de um projecto ambicioso, vocacionado fundamentalmente para a Prospeção Geofísica e Ciências da Terra. Para ir ao encontro das necessidades do mercado, a *GeoSurveys* especializou-se nas áreas da Prospeção Geofísica e Geologia *Onshore*, *Near-shore* & *Offshore*, nos vários domínios da sua aplicação (Figura 1), nomeadamente a recursos hídricos, ao planeamento e gestão de projectos em geofísica, ao impacto ambiental, à arqueologia e património, à geotecnia e engenharia civil, à prospeção mineira, ao risco de catástrofes naturais.

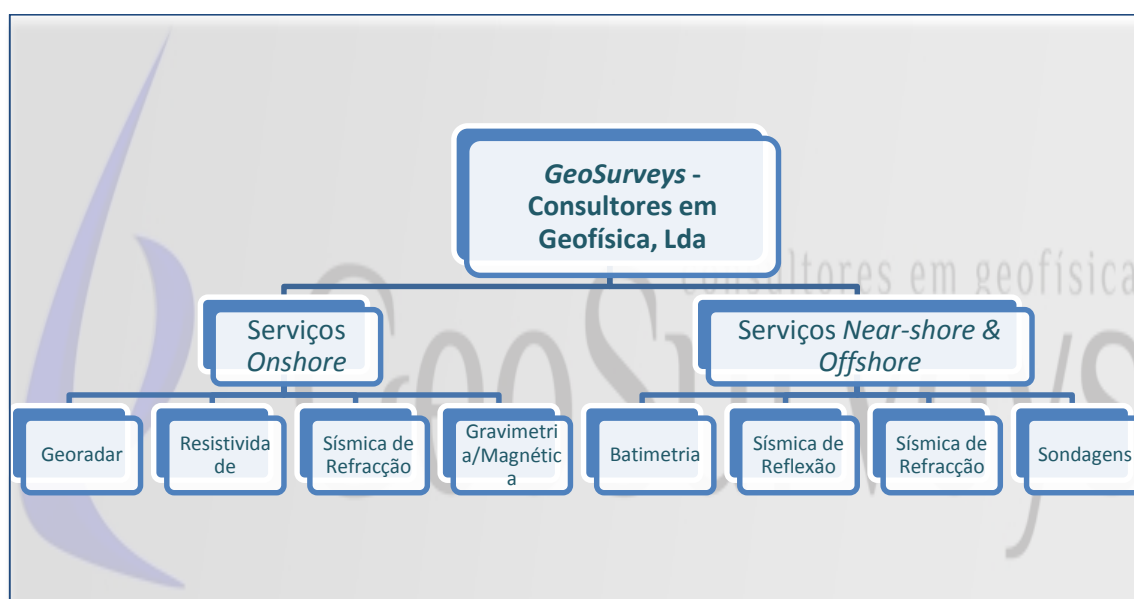


Figura 1 - Áreas de atuação da *GeoSurveys*.

Graças ao contínuo investimento na contratação e formação de recursos humanos especializados, bem como no desenvolvimento de tecnologias de última geração, a *GeoSurveys* tem vindo a consolidar a sua posição de forma sustentada, assumindo-se hoje como líder no mercado em Portugal. Nos últimos anos tem sido estratégia da empresa a expansão e consolidação em mercados internacionais, com ênfase nas ditas “economias emergentes”. Esta aposta tem-se materializado na realização de projectos em diversos países, tais como Qatar, Turquia, Irlanda, Dinamarca, Islândia, Holanda, Angola, Moçambique, Cabo Verde, São Tomé e

Príncipe, Guiné Bissau, Camarões, Malawi, Equador, Perú, Brasil, EUA, Venezuela, China, Vietnam, Jordânia, Singapura e Índia (Figura 2, [www.geosurveys.pt](http://www.geosurveys.pt)).



Figura 2 - Locais onde a GeoSurveys tem realizado trabalhos de prospecção geofísica.

A empresa está estruturada de uma forma em que consegue manter os seus funcionários organizados, alertas e prontos a responder a qualquer solicitação por parte de potenciais clientes, providenciando sempre um serviço de excelência reconhecido pelos seus parceiros. Este facto é comprovado pelo aumento do volume de negócios verificado nos últimos anos.

Tendo em conta os serviços prestados e de forma a rentabilizar de uma forma eficaz os seus recursos e funcionários, a GeoSurveys está dividida em três Departamentos: o Departamento Financeiro, liderado pelo *General Manager* Francisco Sobral; o Departamento de Geofísica Marinha, liderado pelo Geofísico Sénior Henrique Duarte; e o Departamento de Geofísica em Terra, liderado pelo Geofísico Sénior Carlos Grangeia. O cargo de Director Executivo é ocupado pelo Geofísico Sénior Hélder Hermosilha.

Dentro destes departamentos encontram-se equipas multidisciplinares constituídas por geofísicos, geólogos e engenheiros geólogos, distribuídos entre escritório e campo, que trabalham de forma a dar uma boa resposta as várias necessidades dos clientes.

### 1.3. Objectivos do trabalho desenvolvido

Durante os seis meses de estágio na GeoSurveys, para além da vertente de aprendizagem académica, pretendia-se obter a experiência a nível profissional em ambiente empresarial, assim como uma familiarização com o modo de funcionamento de uma empresa no ramo da Geofísica Marinha; estes objectivos foram plenamente cumpridos.

Durante este estágio foram desenvolvidas várias tarefas integradas nos métodos de funcionamento da empresa, de forma a obter uma familiarização com as rotinas diárias dos trabalhadores numa *workstation* de processamento de dados de reflexão sísmica multicanal, aprender a utilizar os *softwares* de processamento *Radex Pro*, da *Deco Geophysical*, e *ProMAX*, da *Landmark Graphics Corporation*, assim como de outros *softwares* que servem de auxílio aos trabalhos. Estes conhecimentos foram posteriormente aplicados ao caso de estudo apresentado nesta tese.



Para ganhar experiência e crescimento a nível profissional, contribuíram largamente os trabalhos de escritório, participações como *Trainee* nalguns projectos de processamento executados pela empresa, e a participação numa campanha de aquisição de sísmica de refacção em Angola, como operador da empresa.

Sendo um dos principais objectivos, em termos académicos, a introdução a novos conceitos relacionados com o processamento de dados de sísmica, estes foram alcançados, com a ajuda dos Geofísicos Sêniores Jhonny Miranda e Daniela Gonçalves, que acompanharam de forma próxima os trabalhos realizados durante o período de estágio.

Depois de algum período de adaptação ao *software*, introdução a novos conceitos sobre sísmica marinha e ao procedimento padrão da empresa no que toca ao processamento de dados, deu-se início ao trabalho de pesquisa sobre o impacto que as condições de operação podem ter na qualidade do sinal multicanal, através da utilização de um fluxo de processamento *standard* utilizado na empresa.

#### 1.4. Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada na zona *offshore* da ilha de *Pulau Tekong* em Singapura, com a profundidade a variar entre 2 e 10 metros (Figura 3).

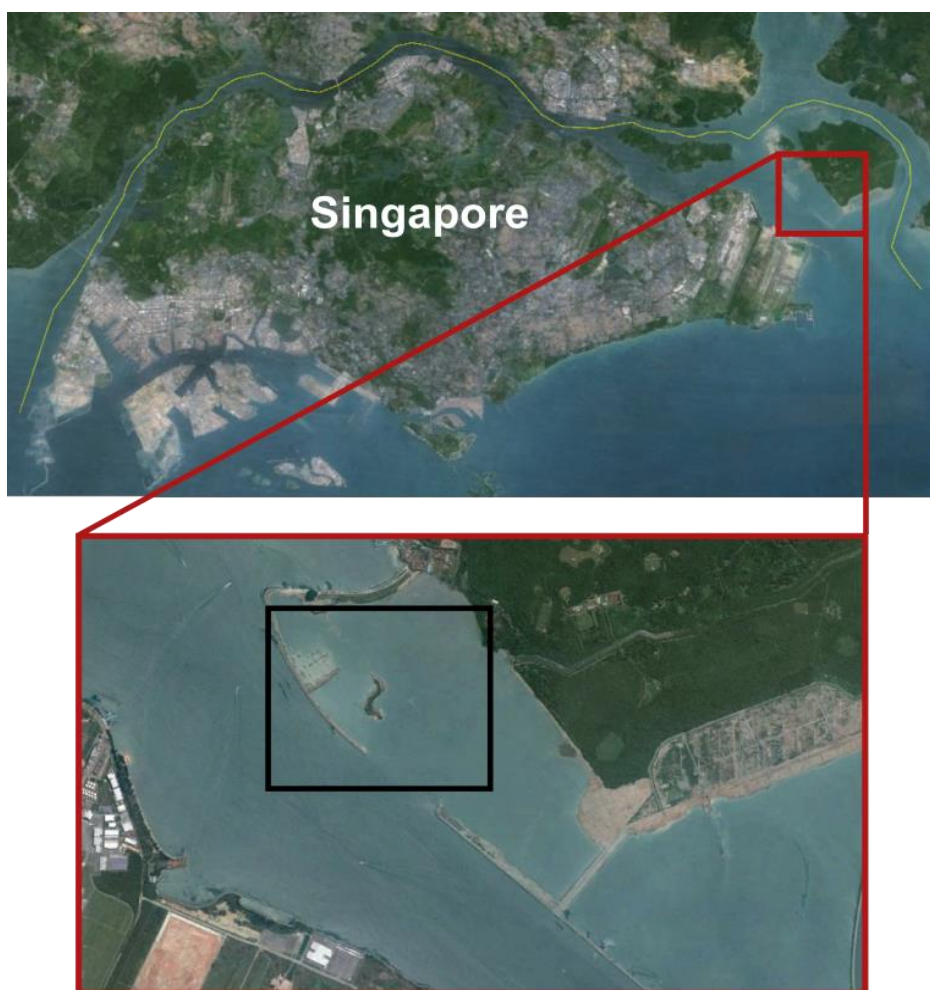


Figura 3 - Localização geográfica da área de estudo, na ilha Pulau Tekong, em Singapura.

A ilha de Pulau Tekong está situada a aproximadamente 24 Km a NE da capital do país, que também é Singapura.

A área de estudo (Figura 4) tem aproximadamente 3,3 Km<sup>2</sup> e é limitada por um polígono com as seguintes coordenadas UTM :

▪ Canto NE	393040 mE	154778 mN
▪ Canto SE	393040 mE	152650 mN
▪ Canto SW	390820 mE	152650 mN
▪ Canto NW	390820 mE	154778 mN



Figura 4 – Área de estudo e localização das linhas sísmicas adquiridas e processadas no âmbito deste trabalho. Projecção UTM, Zona 31N, Datum WGS84.

### 1.5. Dados utilizados

Para a execução deste trabalho foram utilizados 18 perfis de sísmica multicanal de muito alta resolução (*UHRs-Ultra High Resolution Seismic*) com o comprimento das linhas a variarem entre 300 e 1700 metros perfazendo um total de aproximadamente 13.5 Km (Figura 6). Os dados pertencem à empresa *YJP Surveyors* de Singapura e foram adquiridos pela empresa *Geo-Resources* – Singapura. Originalmente os dados foram gravados no formato *Geo-Marine Proprietary Binary Format* (GRDF) com o comprimento de registo de 200 milissegundos e intervalo de amostragem de 300 milissegundos, sendo a *GeoSurveys* a empresa responsável pelo tratamento e processamento dos dados.

A aquisição dos dados ocorreu entre os dias 11 e 14 de Dezembro de 2014, usando um sistema *UHRs*, que inclui como fonte de energia um *Geo-Spark* de 1000 J, um *sparker Geo-Source 200 tips light weight* (LW) como fonte sísmica, um *streamer* de 48 canais (um hidrofone por canal) com um espaçamento entre canais de 1 metro, um gravador *multitrace* e um GPS diferencial (*DGPS Differential Global Positioning System*) para o posicionamento do navio.

## 1.6. Metodologia de trabalho

Durante o período de estágio e execução dos trabalhos, seguiu-se a metodologia de trabalho típica utilizada na execução dos projectos dentro da *GeoSurveys*, principalmente no que diz respeito ao processamento de dados de sismica multicanal.

A metodologia de trabalho consistiu inicialmente na familiarização com os procedimentos adoptados pela empresa, antes do trabalho de processamento propriamente dito. Estes procedimentos consistem em preparar a base de dados onde serão armazenados os dados recebidos, de forma a assegurar a sua correcta organização e fácil gestão.

Uma vez recebido o conjunto de dados (*Handover*), fez-se a sua preparação, altura em que foram feitas: a conversão dos dados do formato GRDF para *SEG-Y* (formato *standard* da *Society of Exploration Geophysicists*); a verificação dos *logs* de navegação (*Nav Log QC*) de cada linha; e a verificação se existia qualquer erro principalmente nas coordenadas do navio ou/e ou do *streamer* e no número de registos de tiro (*FFID – Field File Identification Number*). Após estas operações, foram feitos *layouts* das linhas no software *Surfer*, para auxiliar no controlo de qualidade dos *logs* de navegação (ver Figura 4), e é efectuada a verificação do *log* de operador, no qual estão registadas as condições em que foram adquiridos os dados, parâmetros de aquisição utilizados, a geometria adoptada e toda informação necessária para se proceder a fase de processamento dos dados sísmicos.

De seguida, e após familiarização com o *software* utilizado no processamento dos dados, neste caso particular o *Radex Pro*, foi feito o *input* dos dados sísmicos no programa e o respectivo controlo de qualidade. Nesta etapa foi feita a visualização dos dados em registo de tiro (*shot gather*), de forma a ver os vários traços para um mesmo tiro, e em registo de traço (*trace gather*) onde se vêem todos os traços referentes a um mesmo canal, para os vários tiros.

Nos *shot gathers* (Figura 5), além de se identificar a maioria dos tipos de ruído registados, e registos de tiro sem qualquer informação ou problemas de sincronização nos traços, através do espectro de frequências verificou-se onde se encontram as frequências associadas com ruído com amplitudes mais altas; pôde ainda confirmar-se a frequência de amostragem através da frequência máxima presente no espectro.

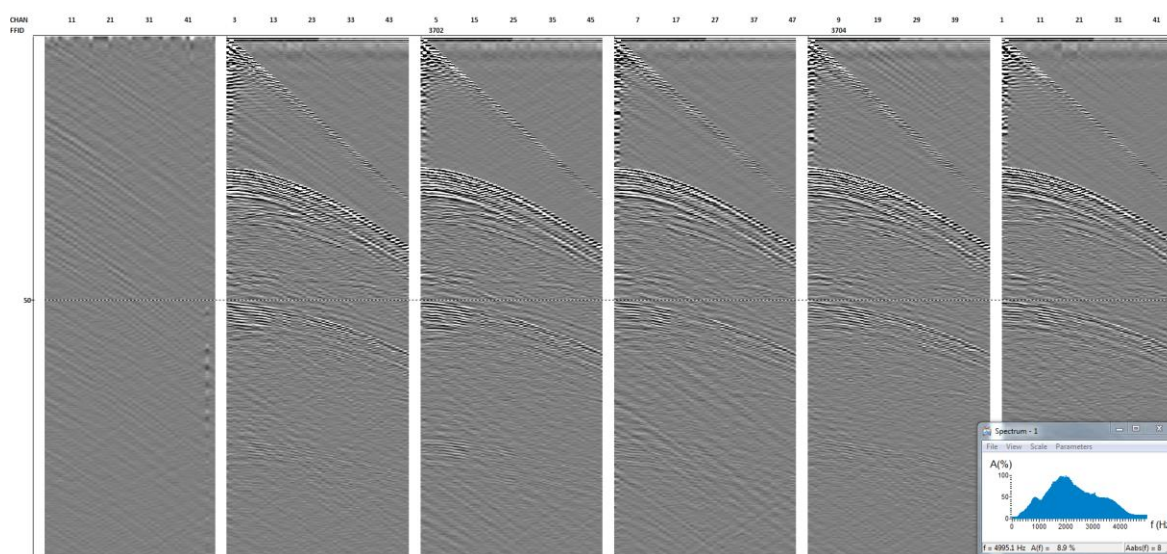


Figura 5 - *Shot gather* do registo de tiro 3700 ao 3705 e respectivo espectro de frequências, linha 031\_Line1. Escala vertical em milissegundos (TWT).



Nos *trace gathers* (Figura 6) verificaram-se os canais que apresentam ruído superior em relação aos restantes canais e que possam prejudicar as fases subsequentes do processamento, e verificaram-se os *offsets* através dos tempos de chegada da onda directa. Através do fantasma da fonte (*notch*) presente no espectro de frequências feito na análise espectral, (ver 4.4.1.2) determinou-se a que profundidade se encontra o canal durante o reboque do *streamer* e com isso verificou-se quando o *streamer* esteve a afundar-se ou a dirigir-se à superfície.

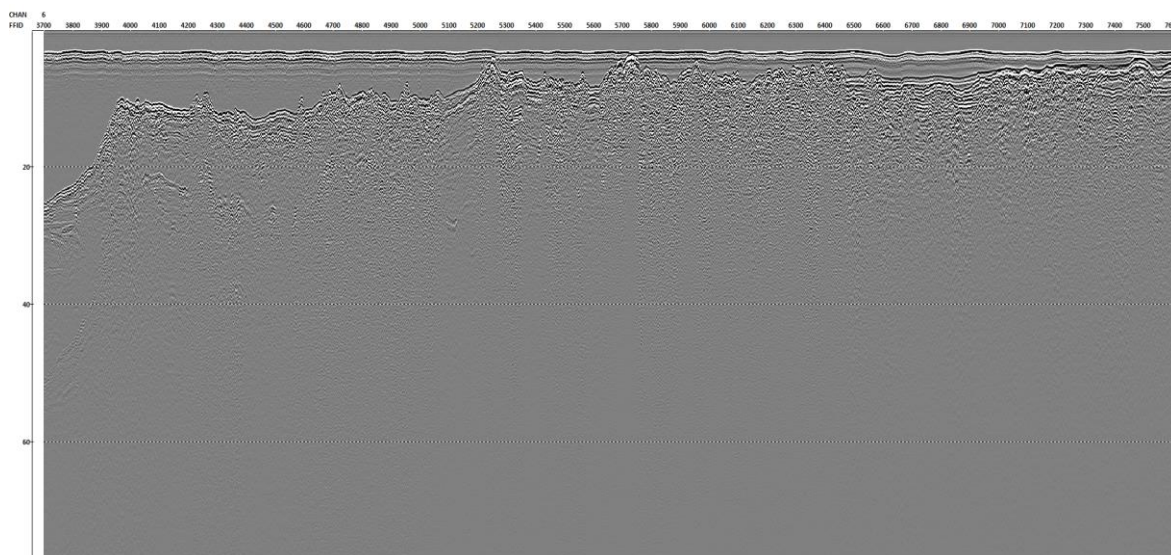


Figura 6 - *Trace gather* do canal 6 da linha 031\_Line1 e respectivo espectro de frequências. Escala vertical em milissegundos (TWT).

Como nas restantes fases de processamento os dados são visualizados em função dos registos em *Common Mid Points* (CMPs), definiu-se a geometria de campo, com a localização da fonte e dos receptores para cada tiro e definiram-se os *offsets* reais, o número de canais, o espaçamento entre canais, e o *bin size* (metade do valor do espaçamento entre canais) que é utilizado pelo *software* no cálculo da cobertura múltipla (*Fold*) para cada CMP.

O acerto e definição da geometria fez-se com base nos *offsets* obtidos nos *trace gathers* onde foram medidos os tempos de chegada da onda directa em canais previamente seleccionados. Neste caso, tratando-se de um *streamer* de 48 canais, os tempos de chegada da onda directa foram medidos nos canais 1, 2, 3, 6, 12, 24, 36 e 48. Os *offsets* obtidos desta forma são os reais, porque indicam a posição em que estavam a fonte e o *streamer* em relação ao centro do navio (GPS). Uma vez que os *offsets* pré-definidos antes da aquisição vão sofrer alterações durante a aquisição dos dados, devido a ondulação, correntes laterais, variação da velocidade e direccionamento do navio, fizeram-se cálculos destas variações. Considerando o sistema de eixos *xy* em que o GPS corresponde a origem do eixo *x* e *y* a direcção do navio, corrigiu-se a geometria, adicionando os valores das alterações aos da geometria pré-definidos para a posição da fonte e do *streamer* em relação ao GPS. Terminado o acerto da geometria fez-se a verificação dos *offsets* nos canais onde foi feita a medição dos tempos de chegada da onda directa, visualizados em *trace gather*. Para esse efeito, introduziu-se um “marcador” no fluxo de processamento, através de um *Trace Header Math*; esse “marcador” traça uma linha tangente ou ligeiramente por cima da onda directa. Outra forma de verificar a qualidade da geometria é a visualização dos CMPs (*Common Mid Point*) com a correcção de NMO (*Normal Moveout*) e sem fazer *stack*: o reflector que

representa o fundo do mar deve aparecer o mais horizontal possível; caso contrário a geometria obtida não é a mais adequada, o que significa a repetição do processo de correcção da geometria.

Todos os processos anteriores foram efectuados sobre *raw datas*, que são dados que ainda não sofreram qualquer fase processamento significativa.

Fez-se de seguida a desconvolução da assinatura para aumentar a resolução vertical da secção sísmica, onde o sinal é comprimido ao máximo sem afectar as frequências, atenuar os fantasmas da fonte e do *streamer*, além disso elimina algum ruído e compensa as limitações da fonte e dos receptores. A desconvolução consiste no princípio de que se conhece o impulso de entrada (assinatura da fonte) e o impulso de saída (traço sísmico obtido), mas pretende-se saber a reacção do terreno ao impulso de entrada. A assinatura da fonte foi modelada utilizando reflexões do fundo do mar através da seleção de traços com bom registo de resposta do fundo do mar. Na desconvolução utilizou-se o módulo de processamento “*Custom Impulse Trace Transform*” do *RadexPro*, tendo como parâmetros principais o espectro de amplitudes (*Amplitude spectra*) e o espectro da fase (*Phase spectra*). Estes parâmetros definem os tipos de operações a aplicar aos espectros de amplitude e da fase para cada traço sísmico e para o impulso de entrada, em que a combinação dos parâmetros da divisão no espectro de amplitudes e subtracção no espectro da fase correspondem à desconvolução. Na divisão, os espectros de amplitudes de todos os traços sísmicos são divididos pelo espectro de amplitudes do impulso de entrada e na subtracção, o espectro da fase do impulso de entrada é subtraído do espectro de fase de cada traço sísmico.

Durante o processamento, os dados apresentam irregularidades ao longo da superfície do fundo do mar nas secções sísmicas, devido principalmente à variação da profundidade de reboque da fonte e do *streamer* em relação à superfície do fundo do mar, variações provocadas pela ondulação e variações na velocidade do navio durante a aquisição, e ainda às variações laterais das velocidades das ondas sísmicas próximo da superfície. Estas causas fazem com que o NMO no registo de tiro (*shot gather*) nem sempre corresponda à curvatura ideal da hipérbole, e no CMP *gather* a secção sísmica apresenta irregularidades, facilmente observadas nos reflectores que correspondem ao fundo do mar (reflector primário) e em zonas das secções sísmicas com declives acentuados. Para a correcção destas irregularidades e melhor qualidade do *stack*, fizeram-se as correcções estáticas residuais através do *UHRs trim statics*, nos CMP *gathers* com os NMO corrigidos, para as estáticas da fonte e no registo de tiro (*shot gather*) para as estáticas do receptor. O *UHRs trim statics* é um método desenvolvido pela *GeoSurveys*, para correcções estáticas dos traços para compensar os movimentos verticais da fonte e do *streamer*.

Feitas as correcções estáticas, são produzidas secções sísmicas em *Brutestack* no formato *sgy*, em que o *dataset* que serve de *input* é o resultado da desconvolução. Sobre a secção *stack* podemos fazer o *display* da cobertura da sub-superfície (*Fold*) para cada CMP, para cada CMP *gather*.

No fluxo seguinte são produzidos ficheiros *sgy* dos dados, onde é feita a atenuação do múltiplo através do módulo “*Zero-Offset DeMultiple*”, os *demul.sgy*. O *dataset* de *input* é também o obtido na desconvolução.

Nesta fase foi feito o controlo de qualidade para avaliar o equilíbrio da fonte e do *streamer*. Através de histogramas dos valores das estáticas dos receptores em função da frequência das estáticas verifica-se a frequência dos valores das variações verticais do *streamer* e através de um gráfico de números de FFIDs em função do número de canais, e representados por uma escala de cores que está dependente dos valores das estáticas do histograma, verifica-se o

comportamento dos canais à medida que vai aumentando o número de FFIDs. Verificou-se ainda o comportamento da fonte através da observação de gráficos das estáticas da fonte em função do CMP, num CMP *gather*.

Finalmente fez-se uma análise de velocidades (IVA) em que se fez o *picking* de velocidades de 50 em 50 CDPs para linhas mais pequenas e de 100 em 100 CDPs para linhas mais longas. Durante toda a fase de processamento preliminar utilizou-se uma velocidade constante de 1530m/s nas correcções de NMO, isto é, a velocidade de propagação das ondas acústicas na água. Com a análise interactiva de velocidades, o NMO passa a ser calculado com velocidades diferentes e de forma intervalada para as várias camadas. A seguir a esta fase são produzidos ficheiros *sgy* resultantes da migração, os *mig.sgy*. A migração consiste em reposicionar os dados para a sua verdadeira localização em detrimento da localização em que foram adquiridos. Para o efeito, foi utilizada a “*Stolt F-K Migration*”, módulo do *Software Radex Pro*, ideal para dados em que a variação da velocidade de propagação das ondas sísmicas através do meio não é muito significativa.

De todas as fases de processamento mencionadas, o *picking* de residuais no UHRS *trim statics* e o IVA são as fases mais demoradas e trabalhosas, dependendo tamanho das linhas, definição da geometria e também do detalhe que se pretende e do rigor exigido.

Após o processamento das linhas, fez-se uma interpretação sumária das unidades sismo-estratigráficas principais, utilizando software *Kingdom Suite* (IHS).

## **1.7. Estrutura da dissertação**

Este trabalho é constituído por sete capítulos, seguidos de referências bibliográficas e anexos, e está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução – faz-se o enquadramento do trabalho, especificando a sua natureza e âmbito, apresenta-se a *GeoSurveys*, definem-se os objectivos gerais do trabalho, a metodologia adoptada, a localização da área de estudo e os dados utilizados, terminando com uma breve descrição da estrutura do trabalho.

Capítulo 2: Método de sísmica de reflexão – neste capítulo faz-se uma introdução teórica aos princípios de funcionamento do método, aquisição de sísmica de reflexão multicanal e faz-se uma descrição do equipamento de aquisição utilizado em meio marítimo.

Capítulo 3: Processamento de dados de sísmica de reflexão – faz-se introdução ao conceito de sinal e apresentam-se os passos básicos e mais importantes do processamento dos dados de sísmica, com uma breve descrição de cada um deles.

Capítulo 4: Caso de estudo – Projecto Singapura 2015 – principal capítulo deste trabalho, explica-se a finalidade dos dados, faz-se um enquadramento geológico da área de estudo, e descreve-se a forma como foi conduzida a aquisição dos dados, o controlo de qualidade onde além do ruído se avalia o impacto das condições de operação na qualidade do sinal multicanal e o processamento dos dados de sísmica multicanal de muito alta resolução.

Capítulo 5: Breve interpretação dos dados – explica-se como é feita a interpretação das unidades sismo-estratigráficas em secções sísmicas e é feita a interpretação das principais unidades nas secções sísmicas processadas.

Capítulo 6: Discussão de resultados – são avaliados os resultados obtidos no processamento dos dados em estudo em função da influência das condições de aquisição e propõem-se medidas de forma a melhorar os dados em termos de aquisição e processamento.

Capítulo 7: Conclusão – sendo o capítulo final, faz-se uma síntese do que se concluiu durante o período de estágio e o trabalho realizado.

Referências Bibliográficas – livros, artigos, relatórios e páginas web citadas.

Anexos – contêm informação que serve de apoio à informação apresentada na estrutura interna do trabalho.

## **2. Método de reflexão sísmica**

A aquisição de sísmica de alta resolução em meio aquático é principalmente confinada nos primeiros 60 metros do subsolo (abaixo do fundo do mar). Esta é a área onde a maioria das aplicações de engenharia tomam lugar e estima-se que cerca de 80% deste trabalho é feito nos primeiros 25 metros. Aplicações típicas incluem reconhecimento de amostras geológicas, explorações mineiras, estudo de fundações para plataformas *offshore* e desenvolvimento de portos (Applied Acoustic Engineering Ltd., 2005).

A qualidade dos registos obtidos em estudos de sísmica de reflexão depende principalmente da presença de horizontes no subsolo que possam reflectir energia acústica. Diferenças no tipo de formação, densidade, conteúdo em água e o grau de sedimentação influenciam largamente a capacidade reflectora de camadas da subsuperfície (Applied Acoustic Engineering Ltd., 2005).

Existem outros factores que incidem sobre o sucesso da aquisição de sísmica de reflexão. Estes podem ser convenientemente agrupados em três classes: limitações externas, navio e limitação dos instrumentos (Applied Acoustic Engineering Ltd., 2005).

- Limitações externas são aquelas que não podem ser controladas. O maior factor externo são as condições meteorológicas: o mar agitado não só cria desconforto e condições difíceis a bordo do navio, mas causa um aumento no ruído de fundo. Isto pode reduzir a qualidade dos registos.
- Limitações do navio geralmente podem ser superadas através da avaliação dos parâmetros de aquisição e através de uma verificação cuidadosa das capacidades do navio antes da campanha de aquisição. Nalguns casos, podem ser interferências eléctricas ou mecânicas entre o equipamento do navio e os instrumentos de sísmica.
- Limitações dos instrumentos variam com os sistemas individuais, mas no geral os seguintes factores são inerentes em todos os dispositivos de sísmica de reflexão (Applied Acoustic Engineering Ltd., 2005):
  - I. Os registos sísmicos mostram a espessura da camada como função de tempo, assim, a verdadeira espessura apenas pode ser determinada se a velocidade do som através do material for conhecida. Dados precisos de velocidades de ondas sonoras raramente estão/são disponíveis, e portanto as espessuras das camadas devem ser consideradas aproximadas.
  - II. A superfície reflectora nem sempre representa mudanças no tipo de sedimentos, mas podem ser apenas mudanças nas propriedades físicas das formações tal como o tamanho do grão, fácies, porosidade, densidade ou dureza. Portanto, deve-se ter algum cuidado na avaliação da intensidade do sinal registado.
  - III. Em maiores profundidades de água, a área do fundo do mar que recebe som aumenta. Deste modo, registos em águas profundas tendem a mostrar condições

médias sobre uma área em vez de um perfil específico directamente por baixo do navio.

Este número de precauções deve ser levado em conta quando os dados forem interpretados.

## 2.1. Princípio de funcionamento do método

Em sismica, a geologia é examinada usando ondas sísmicas. O objectivo é reconhecer estruturas geológicas e se possível para determinar propriedades do subsolo (Kruk, 2003).

O método de sismica de reflexão é uma das técnicas de prospecção geofísica mais conhecidas e pode ser aplicada de várias maneiras, dependendo do objectivo a que se destina bem como a profundidade de penetração e a resolução desejada.

É um método com um princípio de funcionamento bastante simples em que uma fonte de energia é usada para produzir ondas sísmicas que viajam através da terra até aos detectores de movimento, em meio terrestre, ou de pressão quando a aquisição é feita no mar. Os detectores convertem as variações do movimento ou da pressão em sinais eléctricos que são registados por instrumentos electrónicos (Gadallah and Fisher, 2009).

Em sismica de reflexão a energia é reflectida pelo fundo do mar e ou pelas camadas subsequentes, quando existe mudança de propriedades geofísicas (densidade do meio e a velocidade de propagação das ondas sísmicas através das camadas geológicas) nas zonas de interface entre camadas. A energia reflectida viaja através da água para superfície, onde é registada pelos receptores. Quanto maior for a densidade do meio ( $\rho$ ), maior é a impedância acústica ( $Z$ ) (Equação 1) e maior será o coeficiente de reflexão ( $CR$ ) (Equação 2, válida para a incidência normal, ou quase-normal) nas zonas de interface entre camadas, dando origem a uma maior intensidade da energia reflectida, considerando uma velocidade ( $V$ ) constante.

$$Z = \rho V \quad \text{Equação 1}$$

$$CR = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Equação 2}$$

Medem-se os tempos de chegada das ondas reflectidas e podem ser convertidos em profundidades aparentes das interfaces de camadas (Kearey *et al.* 2002).



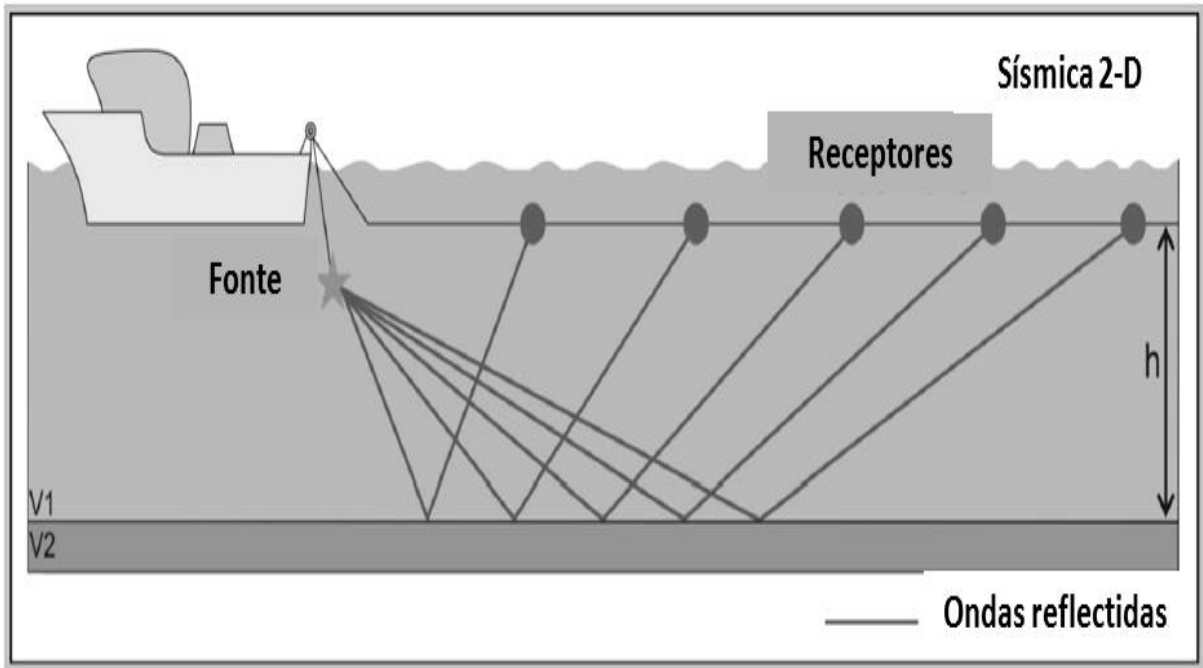


Figura 7 – Esquema do princípio de funcionamento do método de reflexão sísmica no mar.

A onda incidente é separada em duas, ondas reflectidas que são transmitidas para a superfície e ondas refractadas que continuam a propagar-se para direcções diferentes (Figura 8), e com ângulos diferentes, segundo a lei de *Snell* (Equação 3), onde  $\theta_i$  representa o ângulo de incidência,  $\theta_r$  o ângulo de refacção e  $V_1$  e  $V_2$  representam as velocidades das ondas sísmicas em dois meios diferentes. Na Figura 8  $\theta_1$  representa ângulo de incidência e  $\theta_2$  o ângulo de refração.

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_r)} = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Equação 3}$$

O tempo que as ondas reflectidas levam a percorrer desde a fonte até aos receptores, onde são registados, é usado para obter informação sobre a geologia do subsolo, bem como as propriedades das rochas e a profundidade aparente das camadas. O tempo de ida e volta (TWT-*Two-way travel-time*) é o tempo que a onda leva no percurso desde que é gerada na fonte, encontra uma interface entre duas camadas com densidades e velocidades de ondas diferentes, isto é com contraste de impedância acústica, onde é reflectida, e viaja em direcção à superfície onde é registada pelos receptores. O coeficiente de reflexão é proporcional ao contraste entre a impedância acústica (Equação 1 e Equação 2)

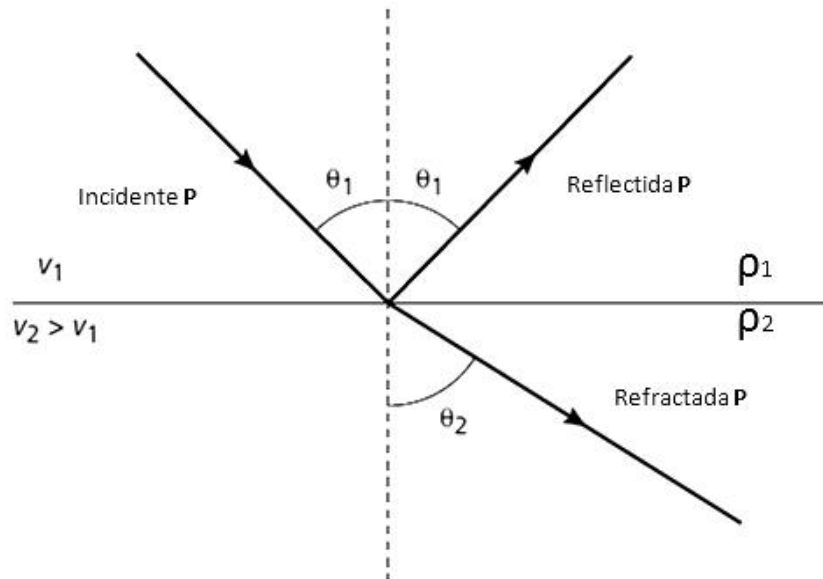


Figura 8 – Reflexão e refração parcial da onda sísmica entre dois meios com diferentes propriedades geofísicas (modificado de Kearey *et al.*, 2002).

Em dados de sísmica de reflexão normalmente existe apenas um *dataset* disponível e as suas propriedades fundamentais, como a resolução, são largamente determinadas pelos parâmetros de aquisição e pelas características do sistema. O processamento subsequente pode melhorar a resolução da imagem mas com algumas limitações. Portanto, a resolução sísmica é matéria de primeira importância na aquisição de dados sísmicos (Yilmaz, 2001).

A resolução consiste na capacidade de distinguir dois objectos distintos muito próximos. Em sísmica consideram-se a resolução vertical ( $R_v$ ) (Equação 5) e a resolução lateral ou horizontal (Equação 6).

A resolução vertical é a espessura mínima da estrutura objecto de estudo que se pretende distinguir; é determinada pelo comprimento de onda (Equação 4) do registo da secção sísmica. De uma forma geral, a resolução sísmica vertical diminui com a profundidade devido ao aumento da velocidade ( $V$ ) e pela atenuação das altas frequências ( $f$ ) do sinal sísmico durante a propagação da onda.

Dois reflectores, tais como o topo e a base de uma unidade estratigráfica, podem ser reconhecidos como eventos sísmicos separados apenas se a distância entre eles for pelo menos  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda da *wavelet* (McQuillin *et al.*, 1984).

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad \text{Equação 4}$$

$$R_v = \frac{\lambda}{4} \quad \text{Equação 5}$$

A frequência das ondas transmitidas para o interior da terra depende do tipo e das características da fonte sísmica. No entanto, a frequência muda à medida que a onda se propaga no subsolo e a onda sísmica perder as altas frequências em profundidade uma vez que elas são mais rapidamente absorvidas. Portanto, ondas de altas frequências são atenuadas muito mais rapidamente do que as ondas de baixas frequências. Quanto mais alta for a frequência mais baixa será a penetração, mas maior será a resolução vertical.

A resolução sísmica horizontal é descrita pela “Zona de *Fresnel*” (Figura 9). O princípio de Huygens afirma que cada parte da frente de onda é a fonte de uma nova onda. A área onde as ondas interferem entre si construtivamente é a área de interesse, denominada como sendo a “1ª Zona de *Fresnel*”. As ondas reflectidas irão interferir construtivamente em zonas onde o seu percurso difere por menos de metade do comprimento de onda, e a porção da superfície reflectora onde ocorrem as reflexões. Por outras palavras, reflexões que se assume regressarem para a superfície a partir de um ponto, estão na verdade a ser reflectidas a partir de uma área com a dimensão da 1ª Zona de *Fresnel* (Sheriff, 1996).

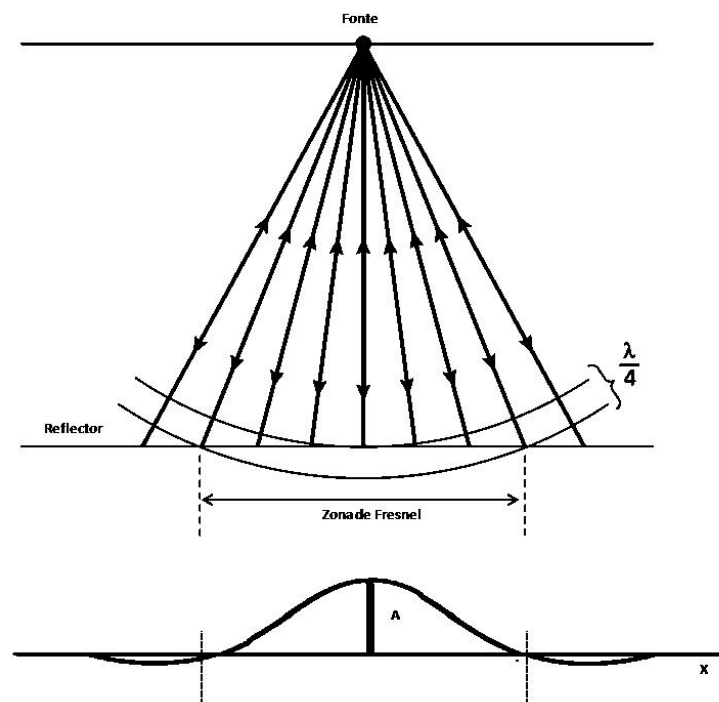


Figura 9 - Esquema representativo da primeira Zona de *Fresnel*. A energia retorna à fonte de todos os pontos de um reflector. A parte do reflector a partir da qual a energia retorna com metade do comprimento de onda da onda inicial reflectida é conhecida como Zona de *Fresnel* (modificado de Kearey *et al.*, 2002).

O raio da 1ª Zona de *Fresnel* depende da velocidade da onda ( $V$ ), da profundidade do objecto alvo ( $t$ , em TWT) e da frequência do sinal sísmico ( $f$ ) (Figura 10) (Sheriff and Geldart, 1995; Sheriff, 1996).

A dimensão da Zona de *Fresnel* pode ser calculada usando geometria simples, para casos de reflectores planos para velocidades constantes e tempo de propagação de ida e volta (Figura 10) (Sheriff, 1996).

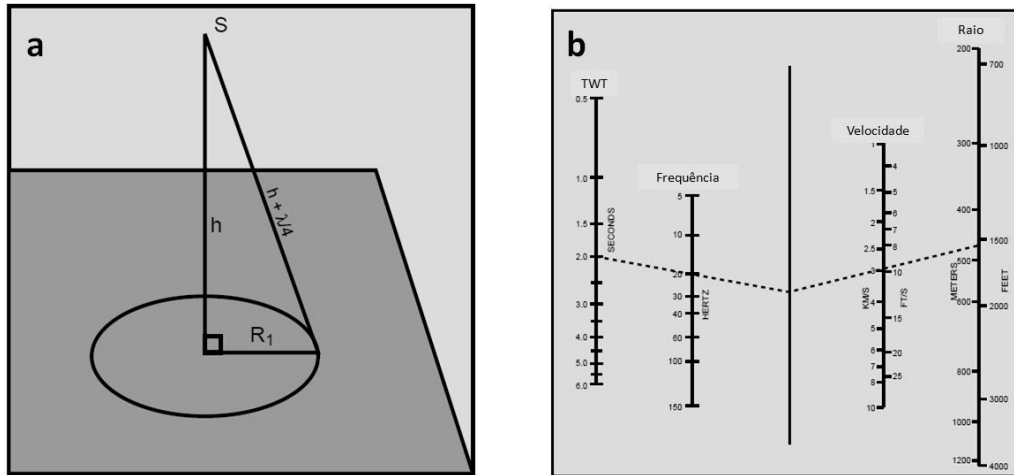


Figura 10 - a) Cálculo do raio da Zona de Fresnel utilizando o teorema de Pitágoras; b) Nomograma para determinar o raio da Zona de Fresnel. (modificado de Sheriff, 1996).

O raio da 1ª Zona de Fresnel,  $FR$ , é dado pela Equação 6, onde  $V$  representa a velocidade média da onda na camada,  $t$  é o tempo de propagação de ida e volta e  $f$  a frequência das ondas sísmica.

$$FR = \frac{V}{F} \sqrt{\frac{t}{f}} \quad \text{Equação 6}$$

Desta forma, a zona de Fresnel aumenta e consequentemente a resolução horizontal diminui, com o aumento da velocidade, com o aumento do tempo de propagação de ida e volta e consequentemente a profundidade, e com a diminuição da frequência do sinal.

## 2.2. Eventos sísmicos

A tarefa básica de interpretar registos sísmicos consiste em selecionar nos dados os eventos que representam as reflexões primárias ou refrações (Figura 11), converter os tempos de chegada em profundidades e inclinações, e mapear os horizontes. Além disso, o intérprete deve estar alerta a eventos característicos como as mudanças de amplitudes ou assinatura que podem produzir informação valiosa sobre outros tipos de eventos, como reflexões múltiplas e difracções (Sheriff and Geldart, 1995).

Diferenças nos tempos de chegada por causa do *offset* oferecem um método especialmente útil da distinção entre reflexões, refrações, múltiplos e outros tipos de eventos.

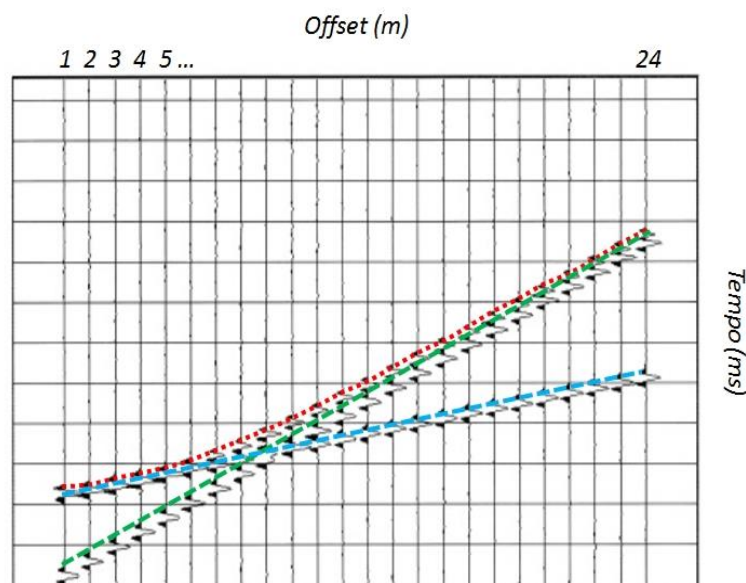


Figura 11 – Eventos sísmicos num sismograma com traços registados por 24 geofones ao longo da superfície da terra em função do tempo, a verde a onda directa, a azul a refacção e a vermelho a reflexão primária (modificado de Kearey *et al.*, 2002).

Os múltiplos são reflexões que ocorrem mais do que uma vez em zonas com significativas mudanças de impedância acústica e retornam à superfície, nomeadamente na interface entre camadas e na interface ar água. Estes raios são chamados reverberações, reflexões múltiplas ou simplesmente múltiplos (Figura 12). Geralmente são reflexões que tendem a ter amplitudes mais baixas em relação as reflexões primarias por causa da perda de energia em cada reflexão. Contudo, existem dois tipos de múltiplos que são reflectidos nas interfaces de altos coeficientes de reflexão e portanto tendem a ter amplitudes comparáveis as reflexões primárias: são os fantasmas e reverberações da camada da água.

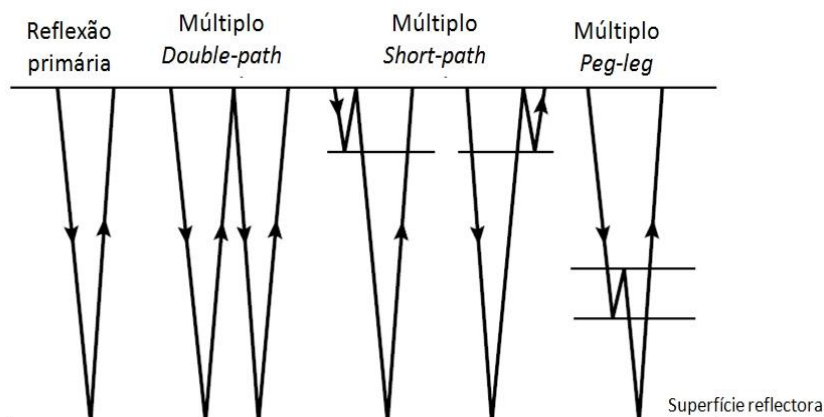


Figura 12 – Exemplos de alguns múltiplos que podem ocorrer (modificado de Kearey *et al.*, 2002).

O reconhecimento e identificação de eventos sísmicos baseia-se em cinco características principais, que são a coerência, amplitudes que se destacam, assinatura, *dip moveout* e o *normal moveout* (Sheriff and Geldart, 1995).

- A coerência, que é a similaridade das reflexões na aparência entre traços sísmicos, é de longe a mais importante e condição necessária no reconhecimento e correlação lateral de eventos (Sheriff and Geldart, 1995).
- As amplitudes caracterizam as reflexões, dado que dependem dos contrastes de impedância acústica. Juntamente com a coerência, são outra característica que nos indicam se estamos ou não perante eventos sísmicos, mas não nos indicam de que tipo de evento se trata (Sheriff and Geldart, 1995).
- A assinatura sísmica diz respeito à aparência distintiva da forma da onda que identifica um evento particular. As reflexões observadas na secção sísmica normalmente resultam da interferência entre componentes reflectoras de conjuntos de interfaces com espaçamentos muito próximos e o aparecimento de reflexões, dando origem à assinatura, dependem do espaçamento e magnitude dos contrastes de impedância acústica individual. Normalmente são relativamente coerentes em distâncias moderadas e desta forma as reflexões apresentam coerência (Sheriff and Geldart, 1995).
- O *moveout* é caracterizado pela diferença sistemática de traço para traço no tempo de chegada de um evento com o *offset*; é o critério mais distintivo para identificar a natureza do evento, sendo o *dip moveout (DMO)* a sistemática mudança no tempo de chegada por causa da inclinação (Figura 14) e o *normal moveout (NMO)* a mudança sistemática do *offset*, distância entre a fonte e o receptor para uma interface horizontal (Figura 13) (Sheriff and Geldart, 1995). Através da Equação 7 e Equação 8 podem ser calculadas as diferenças nos tempos de chegada das ondas sísmicas para o NMO e para DMO respectivamente.

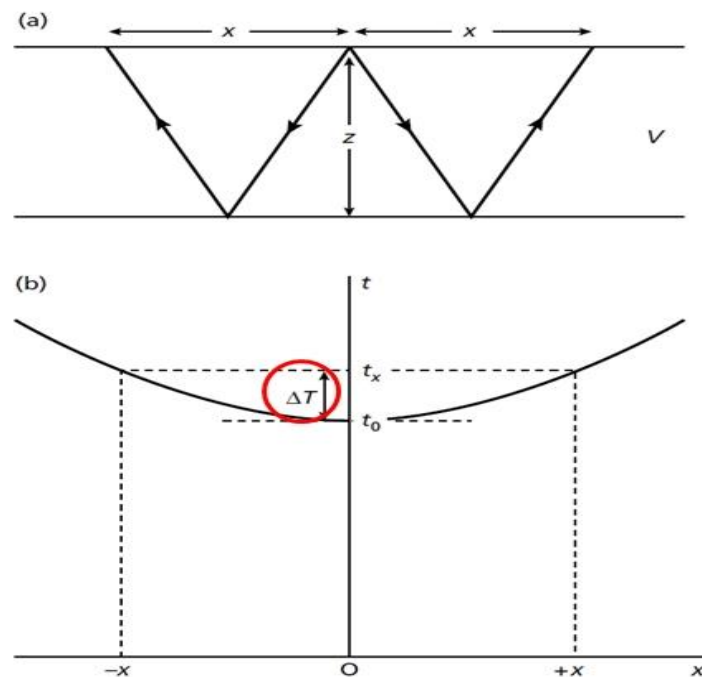


Figura 13 – a) Geometria do percurso das ondas reflectidas através de uma camada horizontal; b) Curva do tempo em função da distância das ondas reflectidas em camadas horizontais, onde  $\Delta T$  corresponde ao NMO (modificado de Kearey *et al.*, 2002).

$$\Delta T = t_x - t_0 = \frac{x^2}{2V^2t_0} \quad \text{Equação 7}$$

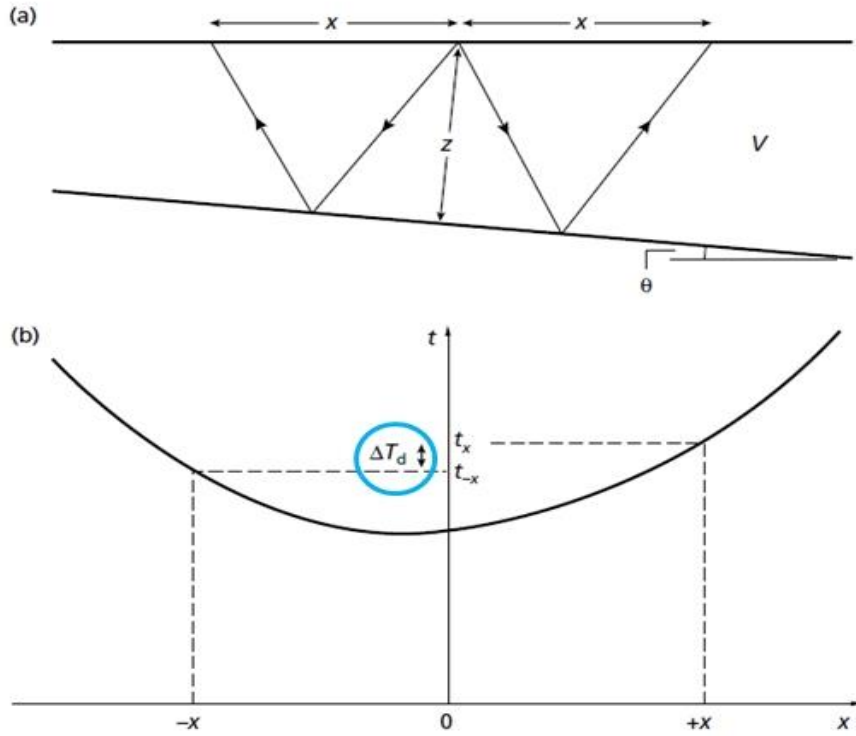


Figura 14 - a) Geometria do percurso das ondas reflectidas através de uma camada com interface inclinada; b) Curva do tempo em função da distância das ondas reflectidas em camadas inclinadas, onde  $\Delta T_d$  corresponde ao DMO – *Dip Moveout* (modificado de Kearey *et al.*, 2002).

$$\Delta T_d = t_x - t_{-x} = \frac{2x \sin \theta}{V} \quad \text{Equação 8}$$

### 2.3. Aquisição de dados

A aquisição sísmica consiste em gerar dados sísmicos através do registo do movimento de ondas sísmicas através do solo causado por uma fonte conhecida. Este processo envolve diferentes configurações de receptores, incluindo o reboque de um *streamer* de hidrofones por um navio, para o registo do sinal sísmico.

Do registo do movimento do solo ao longo do tempo resulta o sismograma que é a informação básica utilizada para interpretação quer através de modelação ou de interpretação das secções sísmicas (Kearey, 2002).

Um programa de aquisição de dados sísmico de sucesso requer um planeamento cuidadoso e detalhado antes do trabalho de campo ter início, que deve incluir:

- A selecção e descrição das estruturas de interesse principais.  
O alvo principal deve ser descrito em termos de localização, tipo de geologia, profundidade, extensão da área de aquisição e inclinações que possam existir, principalmente a inclinação máxima (Gadallah and Fisher, 2009).
- Orçamento dos custos de aquisição.  
A aquisição deve constituir pelo menos 80% do orçamento total (Gadallah and Fisher, 2009).
- Especificar e documentar objectivos e prioridades do programa.  
Normalmente é o empreiteiro o responsável pela execução do programa de aquisição. Muitas vezes feito através de licitações competitivas, o empreiteiro deve saber o que o cliente pretende (Gadallah and Fisher, 2009).
- Estabelecer os padrões de qualidade dos dados.  
Os padrões de qualidade devem ser escolhidos de tal forma que os objectivos desejados sejam alcançados, consistentes com o orçamento e restrições de tempo (Gadallah and Fisher, 2009).
- Definir um calendário e prazos razoáveis.  
O empreiteiro deve saber quando o programa tem início, quanto tempo demora a aquisição e intermediar requisitos de progressão. O cliente tem necessidade em estabelecer requisitos de produção para avaliar a performance do empreiteiro (Gadallah and Fisher, 2009).
- Localizar as linhas de aquisição desejadas no mapa.  
Ter definidos e descritos os alvos e determinados os objectivos, posições das superfícies desejadas e espaçamento entre elas satisfaz os objectivos e podem ser desenhados num mapa da área de campanha. Deve ser entendido que modificações nas localizações desejadas podem ser necessárias por causa das licenças, acesso e outros problemas encontrados na inspecção da área (Gadallah and Fisher, 2009).
- Selecionar o método específico e o equipamento a ser usado.  
A escolha depende do ambiente (terra ou marítimo, terreno, condições da superfície, etc), parâmetros de aquisição necessários para alcançar os objectivos do programa, pessoal e disponibilidade do equipamento, aperto do calendário e custos (Gadallah and Fisher, 2009).

## **2.4. Sistemas de aquisição de sísmica de reflexão multicanal**

Na aquisição de sísmica multicanal em meio marítimo, um *streamer* de hidrofonos e uma fonte de ondas sísmicas são rebocados atrás de um navio. O *streamer* será o receptor de ondas reflectidas provenientes do subsolo do mar e convertidas em sinal eléctrico. Assume-se que as reflexões provenientes do subsolo são provenientes directamente por baixo da linha de navegação executada pelo navio de aquisição (Figura 15).



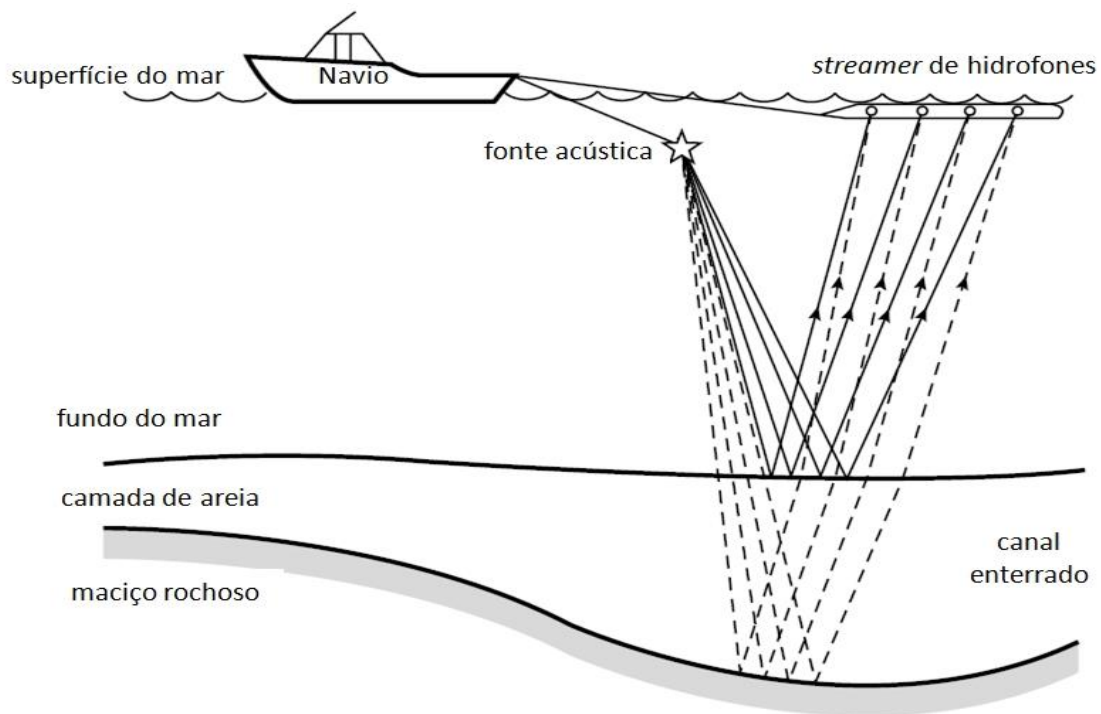


Figura 15 – Esquema básico para a aquisição sísmica no mar (modificado de Kearey *et al.*, 2002).

## 2.5. Fontes sísmicas

Durante muitos anos nas campanhas de aquisição sísmica, as fontes utilizadas eram na sua maioria explosivos, devido à quantidade de energia que libertavam durante as explosões; com a evolução da tecnologia e por questões de segurança e ambientais, os explosivos foram sendo trocados por outros meios que produzem o mesmo efeito que os explosivos, mas são mais eficazes, seguros e menos nocivos ao ambiente.

Os requisitos principais de uma fonte sísmica, segundo Kearey *et al.* (2002) são:

- Energia suficiente através do alcance de frequência mais amplo possível, estendendo-se até a mais alta frequência que se pode registrar.
- A energia deve estar concentrada no tipo de ondas de energia desejadas para uma aquisição específica. Neste caso pretende-se essencialmente gerar ondas P. Outros tipos de energia indesejada podem degradar os dados registados e serem consideradas como ruído coerente.
- A forma da onda sísmica deve ser repetitiva. O traço sísmico deve ser igual em todos os receptores para a onda gerada por aquela fonte.
- A fonte deve ser segura, eficiente e ambientalmente aceitável. Elas devem ser tão eficazes quanto possível em termos de custos. Por vezes, os requisitos de eficiência levam a maior segurança e padrões ambientais além do que é legalmente exigido.

Existe uma grande variedade de fontes sísmicas caracterizadas por apresentarem diferentes níveis de energia, frequências características e método de funcionamento. As frequências podem ir deste 1Hz a várias centenas de hertz (Figura 16).

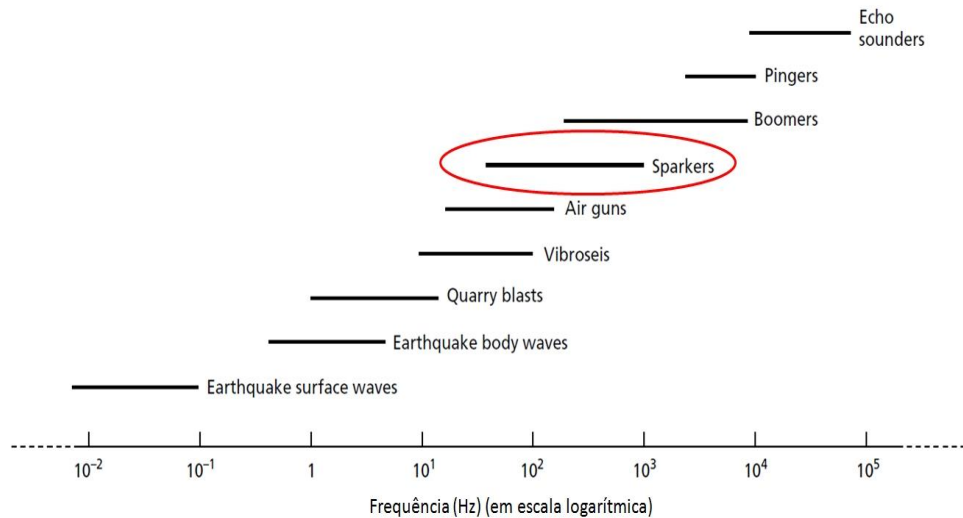


Figura 16 - Espectro acústico das diferentes fontes (modificado de Kearey *et al.*, 2002)

Na sísmica de alta resolução e a profundidades relativamente baixas são utilizadas frequentemente fontes que fazem descargas de grandes condensadores para criar faíscas entre dois eléctrodos dentro da água, vaporizando a água e desta forma gerarem um sinal sísmico - os *sparkers* (Figura 16).

As voltagens de operação variam normalmente entre 3.5 e 4.0 kV, com picos de corrente que podem exceder 200 A. Estas descargas eléctricas levam à formação e rápido crescimento de uma bolha de plasma e a consequente geração do pulso acústico (Kearey *et al.*, 2002).

A penetração de um sparker de 5 kJ é geralmente inferior a 300 metros, mas arranjos de sparkers com uma descarga mais de 200kJ em 50 a 200Hz alcançam penetrações de 1000 metros.

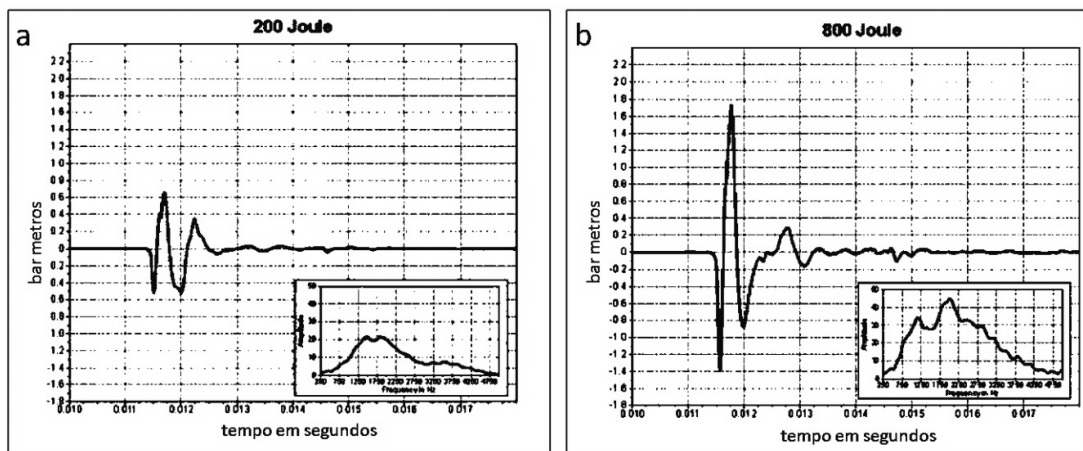


Figura 17 – Assinatura e espectro de frequências do *sparker* Geo-Source 200; a) *sparker* que liberta 200 J de energia e b) *sparker* que liberta 800 J de energia. Escala vertical: Bars metro/divisão.

Na Figura 17 podem-se verificar as diferenças entre uma fonte com 200 Joules de energia e outra de 800 Joules, no que diz respeito às amplitudes que cada uma delas gera; na mesma banda de frequências, que são 5000 Hz de frequência de máxima.

## 2.6. Receptores sísmicos

Para receber e registar as ondas sísmicas reflectidas quando as campanhas de aquisição são feitas no mar, são utilizados *streamers*, que são arranjos de hidrofones (Figura 18) distribuídos por vários canais ao longo de um extenso tubo de plástico preenchido por um líquido que permite ao *streamer* manter-se à superfície.

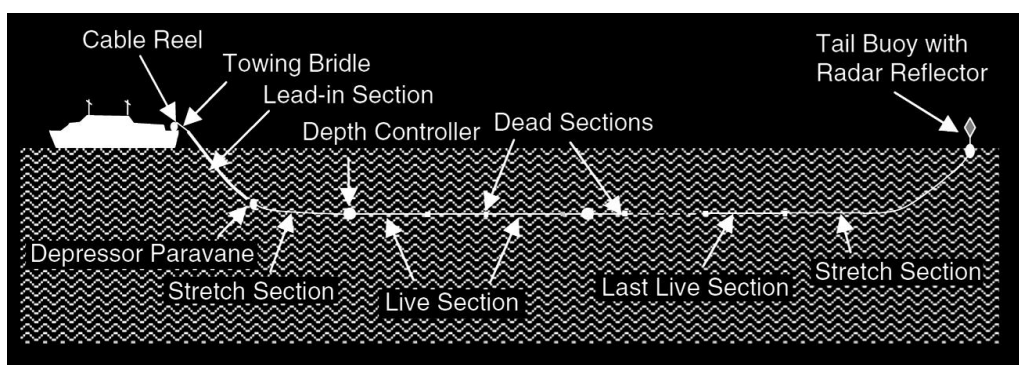


Figura 18 - Configuração de um *streamer* e seus componentes (De Gadallah and Fisher, 2009)

Hidrofones são receptores que possuem cristais piezoelétricos em forma de disco como elementos activos. Estes cristais têm a capacidade de produzirem corrente eléctrica quando são sujeitos a deformações induzidas por variações de pressão. Assim, quando a pressão é aplicada à face do disco piezoelétrico, uma corrente proporcional à pressão é produzida (Figura 19).

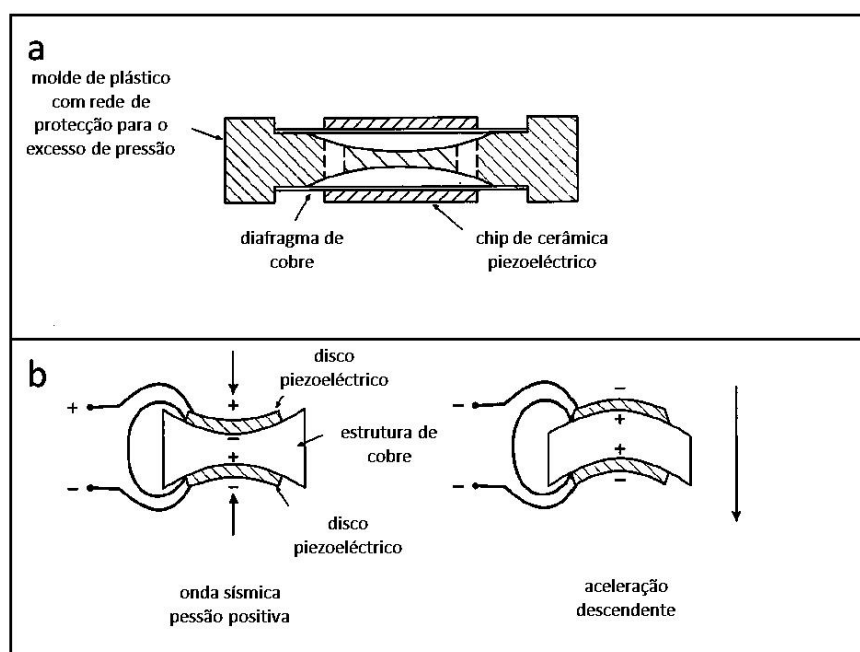


Figura 19 – a) Esquema de um hidrofone; b) Cancelamento da aceleração pelo hidrofone (modificado de Reynolds, 1997).

Esta tecnologia é capaz de suportar pressões de 700 bars e foi utilizada em muitos locais no *design* de *streamers* rebocados em profundidade (Breitzke and Bialas, 2003, Leon *et al.*, 2009, Rowe and Gettrust, 1993, Wood *et al.*, 2008, in Marsset *et al.*, 2014).

O tubo é organizado de forma a ter um dinamismo neutro, e é construído a partir de material com impedância acústica próxima a da água para assegurar boa transmissão de energia sísmica aos elementos do hidrofone. Uma vez que os elementos piezoeléctricos são também sensíveis a acelerações, os hidrofones são frequentemente constituídos por dois elementos montados de costas e ligados em serie para que os efeitos das acelerações do *streamer* a medida que é rebocado através da água sejam cancelados nos registos dos hidrofones. A reposta de cada elemento a mudança de pressão não sofre qualquer alteração e o sinal sísmico é totalmente preservado (Kearey *et al.*, 2002).

Dentro do *streamer* os arranjos de hidrofones estão dispostos em secções (“*live sections*”) e em cada uma dessas secções estão pelo menos vinte hidrofones espaçados entre si por 1 metro (Telford *et al.*, 1990), entretanto, estes arranjos variam de sistema para sistema, tendo sido utilizado no âmbito deste trabalho um *streamer* com um arranjo de apenas um hidrofone por canal. Cada hidrofone de cada secção recebe o sinal sísmico que é somado (*stacking*) com os restantes e o resultado final é o registo ou traço sísmico daquela secção, grupo de receptores ou canal. Com este método de soma a relação sinal ruído é largamente melhorada

O *streamer* para aquisição sísmica em grande escala esta dividido em várias componentes (ver Figura 18).

Para *streamers* convencionais utilizados principalmente para aquisição sísmica na indústria petrolífera, o primeiro componente é um peso blindado *lead-in-cable*, normalmente com 200 metros de comprimento, que vem do navio até ao início do cabo do *streamer* neutralmente dinâmico. O pesado e longo, *lead-in-cable* é usado para afundar o cabo dos hidrofones até a sua profundidade de operação e para providenciar algum isolamento do arremesso e movimento de lançamento do navio e ainda isolado do ruído da maquinaria do navio. Normalmente tiras de borracha ou chapas, as carenagens, são fixadas na parte avançada do *lead-in* para cortar a turbulência que ordinariamente segue um objecto transversalmente rebocado através da água. Depois do *lead-in* do cabo do *streamer* existe uma “*stretch*” section ou *dead section*, porque normalmente não contem hidrofones (Sheriff and Geldart, 1995), e as suas componentes de tensão são feitas de corda de nylon ou material elástico parecido. Maior parte da vibração não atenuada pelo *lead-in* presume-se absorvida pela *dead section*. O último grupo de hidrofones é seguido por outra secção semelhante e a *tail buoy* que flutua à superfície. Esta *tail buoy* serve para marcar o fim do cabo e é essencial para recuperar um cabo cortado, para calcular o posicionamento do *streamer* e reduzir o desvio do *streamer* devido a correntes da água (Sheriff and Geldart, 1995).

Em intervalos adequados ao longo do *streamer*, 8 ou 10 sensores de pressão (*pressure-sensitive*) controladores de profundidade ou “*birds*” são anexados para manter o cabo a uma profundidade óptima. Cada unidade contêm asas que fazem baixar ou subir o cabo, dependendo do ângulo que eles fazem com a horizontal (Dobrin and Savit, 1988).

Alguns dos benefícios da utilização de incorporações no *streamer*, tais como as secções *lead-in*, bem como outros designs de redução de ruído é que as aquisições marinhas agora podem ser conduzidas a grandes velocidades de reboque e condições meteorológicas adversas; também se consegue melhorar a relação sinal ruído, o que permite aos geofísicos obter informações mais

profundas e melhores imagens depois do processamento dos dados (Dobrin and Savit, 1988, *in* Ribeiro, 2011).

## 2.7. Tipos de ruído

A confiança da cartografia sísmica é fortemente dependente da qualidade dos registos. A qualidade dos dados sísmicos varia de uma forma tremenda a partir de áreas onde excelentes reflexões são obtidas para áreas nas quais a maioria dos equipamentos modernos, técnicas de campo complexas, e processamento de dados sofisticadas não proporcionam dados utilizáveis (NR áreas, *areas of "no reflections"*). Entre estes dois extremos estão a maioria das áreas nas quais se obtêm resultados úteis (Sheriff and Geldart, 1995).

O termo sinal é utilizado para denotar qualquer evento nos registos sísmicos a partir do qual se pode obter informação. Todo o resto representa ruído, incluindo alguns eventos coerentes que interferem com a observação e medições dos sinais. Quando a relação sinal ruído é inferior a uma unidade, a qualidade do registo é normalmente marginal e deteriora-se rapidamente à medida que esta relação vai decrescendo (Sheriff and Geldart, 1995).

O ruído sísmico tanto pode ser coerente ou incoerente. O ruído coerente pode ser seguido ao longo de pelo menos alguns traços; o ruído incoerente é diferente em todos os. A diferença entre ruído coerente e incoerente é frequentemente uma questão de escala e se tivermos geofones/hidrofones mais próximos uns dos outros o ruído incoerente será visto como sendo coerente. Ainda assim, ruído incoerente é definido em relação aos registos que estão a ser usados sem se considerar o quão próximo o espaçamento pode revelar (Sheriff and Geldart, 1995).

O ruído incoerente é frequentemente associado ao ruído aleatório, que implica não apenas ruído imprevisto mas também certas propriedades estatísticas. Deve ser notado que a aleatoriedade espacial e temporal deve ser independente; o traço sísmico usual pode ser considerado aleatório no tempo porque não sabemos quando irá ocorrer a próxima reflexão, com base no que o traço tenha mostrado anteriormente, com a excepção dos múltiplos (Sheriff and Geldart, 1995).

O ruído coerente é muitas vezes subdividido em energia que viaja essencialmente na horizontal, e energia que atinge a propagação mais ou menos verticalmente. Outra distinção importante é entre o ruído que se repete e o que não se repete. As três propriedades – coerência, direcção de propagação e repetitividade, formam a base da maioria dos métodos para a melhorar a qualidade dos registos (Sheriff and Geldart, 1995).

O ruído coerente inclui ondas superficiais, reflexões ou refrações reflectidas a partir de estruturas próximas da superfície tais como planos de falhas ou canais enterrados, múltiplos, etc. (Olhovich 1964 *in* Sheriff and Geldart, 1995). Todos os anteriores excepto os múltiplos propagam-se essencialmente na horizontal e são todos repetitivos nas sucessivas activações da fonte (em cada tiro/registo de tiro/trace gather) (Sheriff and Geldart, 1995).

O ruído incoerente, que é especialmente aleatório e repetitivo, é devido a dispersão de irregularidades próximas da superfície e heterogeneidades tais como pedregulhos ou rochedos e falhas de pequena escala (Sheriff and Geldart, 1995). Ruído aleatório não repetitivo no mar pode ser devido ao tráfego marítimo, grande construções *near* e *offshore* e ainda devido a vida marinha.

### 2.7.1. Ruídos detectados pelo sistema de aquisição marítimo

Mesmo com todo cuidado que se tem na construção e na disposição do *streamer* em relação ao navio, há sempre ruído de quase todo tipo detectado pelo sistema de aquisição, como:

- Ruído ambiental devido à ação das ondas, embarcações e vida marinha (Bedenbecker *et al.*, 1970, *in* Sheriff and Geldart, 1995).
- Ruído transmitido localmente pela água tal como o ruído causado pela turbulência gerada pelo movimento do cabo rebocado, controladores de profundidade, o movimento da *tail buoy* através da água, e a energia irradiada a partir do navio por causa das hélices, motores e outras maquinarias (Bedenbecker *et al.*, 1970, *in* Sheriff and Geldart, 1995).
- Ruído mecanicamente induzido que viaja ao longo do *streamer*, resultante da tensão exercida no *streamer* pela estrutura onde está fixado.

Normalmente o ruído mecanicamente induzido é dominante excepto quando existe mau tempo, altura em que domina o ruído ambiental. O ruído de reboque é reduzido, fazendo um sistema de *streamer* o mais suave possível e mantendo os controladores de profundidade e desvios do *streamer* suaves a pelo menos 3 metros do hidrofone mais próximo, usando a secção *lead-in* para aumentar a distância entre o navio e o grupo de hidrofones mais próximo (*offset*), e esticar secções com *nylon* em vez de elementos de tracção de aço, para reduzir a energia transmitida ao longo *streamer* (Sheriff and Geldart, 1995).

Para aquisição sísmica multicanal de alta resolução em baixas profundidades, não é aconselhável um *offset* demasiado longo porque existe o risco de se perder informação de estruturas que se encontram à superfície. Isto deve-se ao facto de o atraso do múltiplo em relação às reflexões primárias tornar-se cada vez mais reduzido com o aumento do *offset*.

Para reduzir o impacto causado pelo funcionamento e movimento do navio, o equipamento de aquisição é rebocado na zona lateral do navio (bombordo ou estibordo) de forma a evitar a ondulação causada pela parte frontal (proa) e traseira (popa) do navio.

### 2.7.2. Métodos de atenuação de ruído

Devido à existência de muitos tipos de ruído, são empregues vários métodos de atenuação de ruído. Todos os métodos são baseados na diferença entre as propriedades do ruído e do sinal. Na medida em que a natureza do sinal é um pouco subjectiva e as propriedades de ambos, sinal e ruído, não são completamente conhecidas, a atenuação do ruído não pode ser completamente objectiva (Sheriff and Geldart, 1995).

A atenuação do ruído tem início com os registos de campo. Quando o ruído tem energia considerável fora do alcance das principais frequências do sinal, pode ser atenuado limitando as frequências registadas. Componentes de muito baixas frequências, tais como ondas superficiais de alta energia ricas em baixas frequências, podem ser filtradas/eliminadas durante o registo inicial desde que essas baixas frequências estejam suficientemente separadas das frequências das reflexões (Figura 20). Contudo, se o espectro do ruído se sobrepuser ao espectro do sinal, então a filtragem de frequências é de valor limitado na melhoria da qualidade dos registos, pois junto com a eliminação do ruído, eliminaria sinal também. O alcance dinâmico dos instrumentos de campo actualmente é normalmente suficientemente grande e frequentemente a única filtragem de

baixas frequências utilizada no campo é aquela que resulta da resposta das baixas frequências limitadas dos geofones. Da mesma forma, muitas vezes a única filtragem de altas frequências aplicada é a necessária para prevenir o *aliasing* na digitalização (Sheriff and Geldart, 1995).

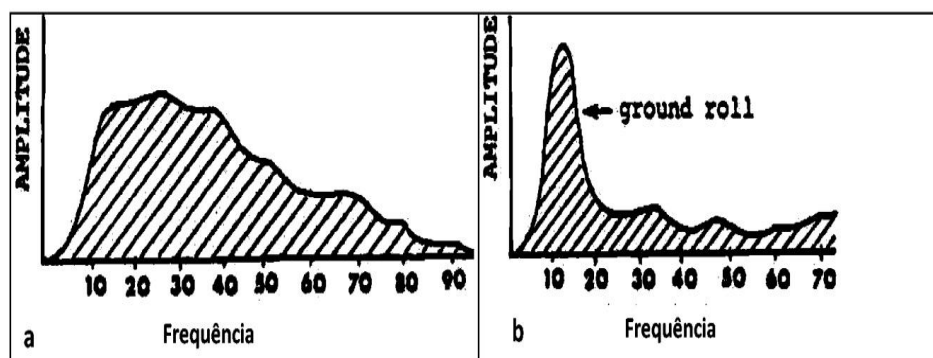


Figura 20 – a) Espectro de frequência com sinal; b) Espectro de frequência com ruído (modificado de Sheriff and Geldart, 1995).

O ruído pode também ser atenuado através da adição dos traços registados em tempos ou lugares diferentes, ou ambos. Isto forma a base de varias técnicas de *stacking*, incluído o *stack* vertical (*vertical stacking*) e o *common-midpoint stacking* (CMP stack), entre outras. O ganho na qualidade dos registos frequentemente é grande por causa da redução no nível de ambos, o ruído aleatório e o ruído coerente (Sheriff and Geldart, 1995).

O *Vertical stacking* consiste em juntar vários registos para os quais a localização tanto da fonte como o receptor é sempre a mesma. É principalmente utilizada com fontes que não requerem grandes quantidades de energia (*weak surface energy sources*) e muitas fontes de aquisição marinha (Sheriff and Geldart, 1995).

O *CMP stacking* é quase universalmente utilizado em sismica multicanal e é muito eficiente na atenuação de vários tipos de ruído. O somatório dos traços compreende energia de fontes diferentes utilizando receptores e fontes de localizações diferentes (Figura 21) (Sheriff and Geldart, 1995).

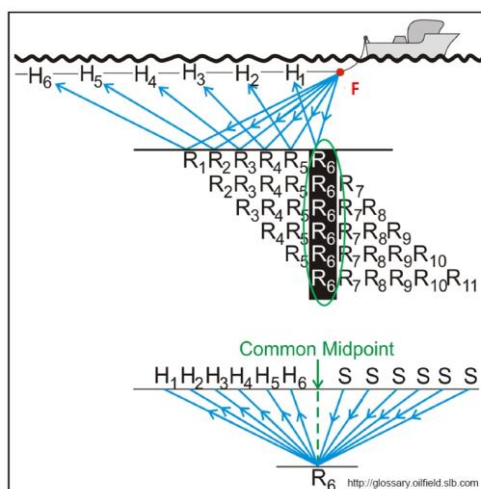


Figura 21 – Geometria de aquisição com cobertura de vários folds (*CMP stacking*) (modificado de <http://glossary.oilfield.slb.com>).

Ao número de traços sísmicos contabilizados em cada CMP/CDP corresponde a cobertura múltipla, ou *Fold*.(Equação 9) Numa boa campanha a aquisição deve ser feita em *half fold*, isto é, com uma cobertura múltipla em média igual a metade do número de canais.

$$\textit{Fold} = \frac{\textit{Número de geofones} \times \textit{Espaçamento entre geofones}}{2 \times \textit{Distância entre disparos}} \quad \text{Equação 9}$$



### 3. Processamento de dados sísmicos

#### 3.1. Introdução ao sinal

Até finais dos anos 1960s e inícios dos anos 1970s os dados eram registados de forma analógica. Nos últimos 40 anos ou mais, os dados sísmicos têm sido registados digitalmente (Gadallah and Fisher, 2009).

O sinal é definido como sendo uma função que transmite informação útil sobre o estado ou comportamento de um fenómeno ou sistema físico. A variável independente pode ser o tempo (sinal temporal) (Figura 22) ou o espaço (sinal espacial). Os sinais podem estar definidos para valores contínuos da variável independente - sinais contínuos – podendo ser definidos por funções, ou então por valores discretos da variável independente - sinais discretos definidos por sucessões.



Figura 22 - Sinal temporal contínuo (Gadallah and Fisher, 2009).

O objectivo principal das técnicas de processamento digital de dados é transformar o sinal original num mais simples, de forma a facilitar a extração de informação. Estas técnicas aplicam-se a sinais digitais, sinal de variável independente e amplitudes discretas.

Num registo digital (Figura 23 b), o sinal sísmico contínuo (analógico) é amostrado em intervalos fixos de tempo, chamada intervalo de amostragem ( $\Delta t$ ). Valores típicos de intervalos (ou passos) de amostragem variam entre 1 e 4 milissegundos para a maioria dos trabalhos de reflexão sísmica convencional. Estudos de alta resolução requerem intervalos de amostragens tão pequenos como 0.25 milissegundos (Yilmaz, 2001a). Desta forma, o *input* que é um sinal contínuo sai como um conjunto de números ou séries temporais. Se o conteúdo de frequências do sinal é consistente com o intervalo de amostragem, o sinal analógico original pode ser correctamente reconstituído (Figura 23) (Gadallah and Fisher, 2009).

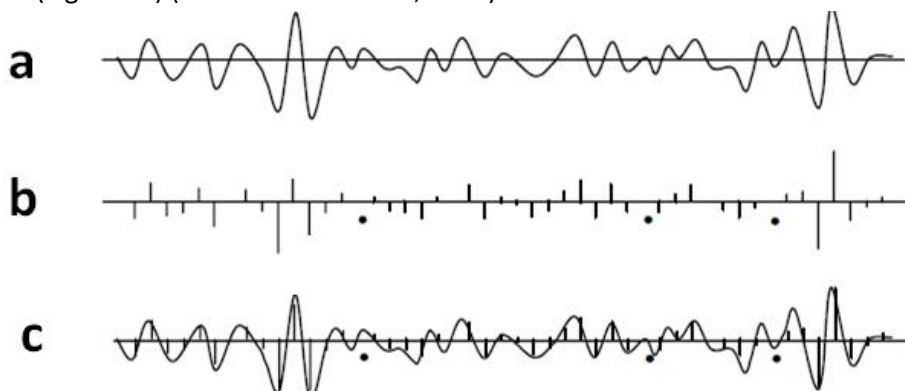


Figura 23 - Amostragem e reconstrução do sinal analógico; a) sinal analógico contínuo; b) sinal digitalizado; c) sinal analógico reconstruído a partir do sinal amostrado (modificado de Gadallah and Fisher, 2009).

De uma forma geral, dado o intervalo de amostragem, a frequência máxima que pode ser restaurada dos dados digitalizados é a frequência de *Nyquist* (Equação 10). E a frequência de amostragem (Equação 11) deve ser maior ou igual a 2 vezes a frequência de *Nyquist*.

$$f_{Nyq} = \frac{1}{2\Delta t} \quad \text{Equação 10}$$

$$f_s \geq 2f_{Nyq} \quad \text{Equação 11}$$

Se a frequência de *Nyquist* é ultrapassada no sinal analógico, altas frequências aparecem como baixas frequências no sinal digital dando origem ao fenómeno de *aliasing* (Figura 24).

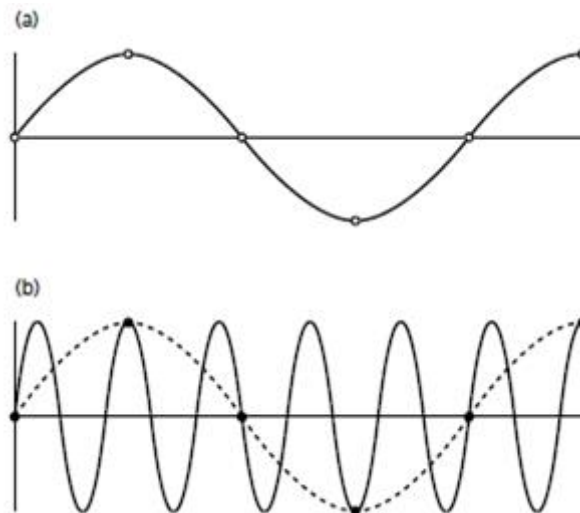


Figura 24 – a) Onda sinusoidal com frequência inferior à frequência de *Nyquist*; b) Onda sinusoidal com frequência superior a frequência de *Nyquist* (traço a cheio), caso em que fica sub-amostrada e as altas frequências aparecem como baixas frequências (modificado de Kearey *et al.*, 2002).

O *aliasing* é um tipo de distorção que deve ser evitado. Quando ocorre, não pode ser removido (Gadallah and Fisher, 2009). Portanto, antes da aquisição dos dados as altas frequências que possam sofrer *aliasing* pelo intervalo de amostragem escolhido devem ser removidas por um filtro analógico no sistema de registo.

### 3.2. Filtragem do sinal

Muitas vezes em sismica sabe-se apenas o intervalo aproximado das frequências de interesse e o intervalo frequências de qualquer ruído de fontes. Para saber o intervalo de frequências que nos interessam para se prosseguir a fase de processamento, tem que se testar os dados com diferentes filtros e comparar os resultados de forma a tomarmos uma decisão.

É desejável ter uma relação sinal ruído muito superior a um. Este é normalmente o caso sobre alguns intervalos de frequências mas não de todos. Na maior parte dos casos a relação sinal ruído é inferior a um nas baixas frequências e outra vez nas mais altas frequências. Uma forma de

alcançar o resultado desejado é aplicar um filtro que atenuie largamente ou anule, de preferência, as componentes de frequências onde relação sinal ruído é inferior a um. Tal filtro é um filtro passa-banda (*band-pass filter*) (Gadallah and Fisher, 2009). Para a selecção do filtro a utilizar utiliza-se a análise espectral.

### 3.3. Traço sísmico

A representação gráfica do *output* de um único detector na propagação da reflexão é o traço sísmico que consiste na representação visual do padrão local do movimento vertical do subsolo (em terra) ou da variação de pressão (no mar) num curto intervalo de tempo após o disparo de uma fonte sísmica próxima. Este traço sísmico representa a resposta combinada das camadas do subsolo e do sistema de registo à fonte sísmica.

Em cada fronteira de camada a proporção de energia incidente no impulso é reflectida em direcção aos detectores. A partição da energia é determinada pelo contraste na impedância acústica das duas camadas, e para os raios que se propagam na vertical, o coeficiente de reflexão pode ser simplesmente calculado através da Equação 3 (Figura 25) (Kearey *et al.*, 2002).

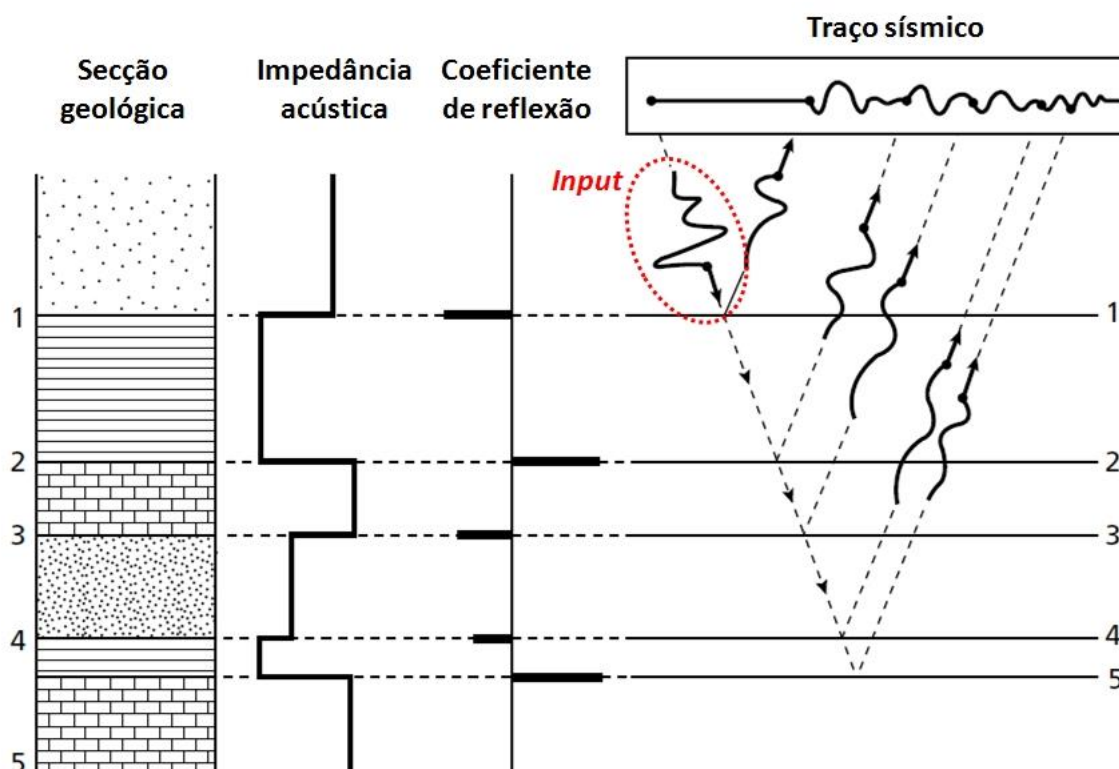


Figura 25 – Traço sísmico resultante da convolução entre o *input* da fonte e a reflectividade do meio (modificado de Kearey *et al.*, 2002).

Os detectores recebem um conjunto de impulsos reflectidos e regista-se o seu tempo de ida e volta (TWT), tempos estes que são influenciados pelas profundidades das interfaces entre camadas, pelo percurso e pela velocidades de propagação das ondas sísmicas através destas camadas.

Na aquisição de sísmica de reflexão, os traços sísmicos são registados, e o propósito do processamento sísmico pode ser visto como a tentativa de reconstruir as várias camadas

geológicas, seguindo a ordem da Figura 25, feito da direita para a esquerda. Isso envolve a remoção de ruído, determinar o sinal de *input* e efectuar a sua desconvolução para se ter a função da reflectividade (em tempo), determinar a função da velocidade para permitir a conversão dos eixos de tempo para a profundidade e a determinação da impedância acústica ou propriedades relacionadas das formações (Kearey *et al.*, 2002).

Na prática, o traço sísmico contém também informação indesejada como múltiplos, ruído coerente e ruído aleatório.

### 3.4. Fluxo padrão de processamento

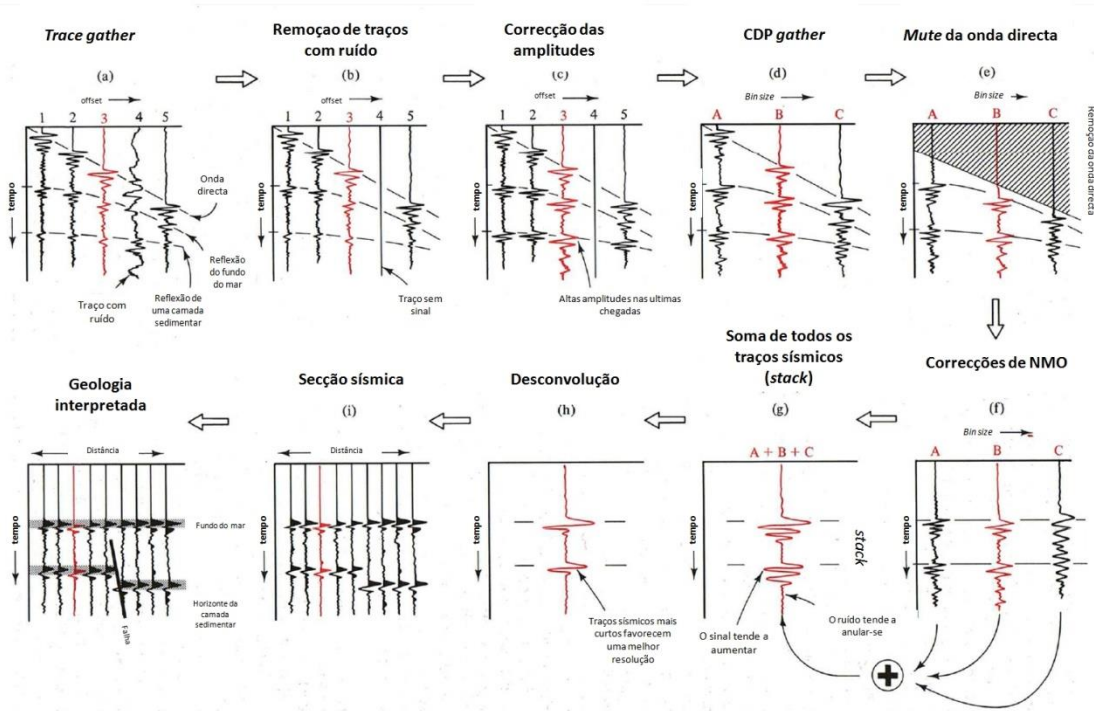


Figura 26 – Fluxo padrão de processamento de dados sísmicos (modificado de Klemperer and Peddy, 1992 in Brown and Hawkesworth, 1992).

Os fluxos padrão de processamento de dados sísmicos são totalmente implementados e conhecidos na indústria com o objectivo final de aumentar a resolução vertical, melhorar a relação sinal/ruído dos dados, e para mostrar os eventos sísmicos na sua posição espacial correcta (McQuillin *et al.*, 1984).

O típico fluxo de processamento mais simples para sísmica 2D inclui a desmultiplexação, edição dos traços, correcção da divergência esférica e geometria, e inclui normalmente ainda a desconvolução, a ordenação por CMP/CDP, a análise de velocidades, a correcção do *Normal Moveout*, a soma dos CMP/CDP (*stack*) e a migração (Figura 26) (Yilmaz, 2001).

Os dados sísmicos por vezes são registados em modo multiplexado no qual amostras correspondentes ao mesmo intervalo de tempo em diferentes registos de tiro são registados de forma consecutiva. Nestas situações, o primeiro passo do estágio de processamento consiste na desmultiplexação, para converter os dados num formato de ficheiros mais adequado e organizado para fins de processamento. O formato convencional mais utilizado para a troca de ficheiros de sísmica é o SEG-Y (Yilmaz, 2001).

Os dados são de seguida editados de forma a detectar e corrigir traços anormais com alto conteúdo de ruído ou polaridade invertida. Se a filtragem básica não for suficiente para reparar os traços “ruidosos”, estes devem ser eliminados se a sua contribuição fizer decrescer a razão sinal/ruído. A filtragem básica é também aplicada a totalidade dos dados com o objectivo de reduzir o ruído característico das baixas frequências originado pelas más condições meteorológicas e/ou as condições do mar e o ruído causado pelos movimentos indesejados dos *streamer* (Yilmaz, 2001).

A correcção de divergência esférica aplicada de seguida é uma função de correcção de ganho para compensar os efeitos da perda de amplitude com a divergência esférica da frente de onda. Finalmente, os dados são corrigidos para a geometria de aquisição com o posicionamento dos tiros e receptores inseridos dentro dos *headers* dos traços. Este simples passo é um dos mais importantes no fluxo de processamento e muitos dos problemas que surgem em etapas mais avançadas são originados por erros de definição de geometria (Yilmaz, 2001).

Depois é aplicada a desconvolução para comprimir a forma da *wavelet* nos dados, recuperar as altas frequências, atenuar as reverberações e múltiplos de período curto, aumentar a resolução vertical dos reflectores e normalizar o espectro de frequências dos dados (Yilmaz, 2001).

Idealmente, o traço sísmico registado é a convolução da *wavelet* da onda sísmica, que viaja da fonte através do subsolo, com os vários coeficientes de reflexão, originados pelas propriedades (em particular a densidade e a velocidade de propagação das ondas sísmicas) das diferentes camadas rochosas atravessadas pela energia sísmica. A desconvolução tenta desfazer este processo de convolução, eliminando a assinatura da fonte e múltiplos derivados, obtendo os diferentes coeficientes de reflexão. Contudo, o sinal recebido não contém apenas informação sobre a assinatura da *wavelet* e do impulso de resposta da terra. De facto, existem muitos outros componentes tais como ruído e limitações nas fontes e receptores, o que torna a tarefa impossível para obter o impulso de resposta real da terra (Figura 25) (Yilmaz, 2001).

A correcção de NMO é então aplicada aos dados ordenados por CMP (*CMP gather*) usando um campo de velocidades previamente criado. Esta correcção remove o efeito do *offset* entre a fonte e o receptor num reflector sísmico sem inclinações, assumindo um que o registo do tempo (TWT) em função do *offset* segue uma trajetória hiperbólica. Dado que as reflexões chegam primeiro ao *offset* mais próximo e mais tarde ao *offset* mais distante, quanto maior for o *offset* entre a fonte e o receptor maior será o atraso observado. Na correcção do NMO, eventos sísmicos que correspondem a reflexões sísmicas de um mesmo ponto reflector comum são horizontalizados para os vários *offsets*, de forma a remover o efeito previamente descrito e os traços poderem ser somados no *stack* (Yilmaz, 2001). O NMO é uma correcção dinâmica dado que as correcções irão diminuir com o aumento no tempo de propagação de ida e volta (TWT) e o aumento na velocidade das ondas nas rochas (Robinson *et al.*, 1986).

Depois da análise detalhada da velocidade, o campo de velocidade resultante é aplicado para a correcção do NMO e para o *stack* dos dados. O *stacking* consiste no somatório de traços que pertencem a uma localização do CMP num único traço depois da correcção do NMO. Os dados do *output* terão as reflexões reforçadas; como o ruído é teoricamente aleatório e quando somado tende a ser cancelado, aumenta-se assim a relação sinal/ruído (Figura 27 a e b) (Azevedo, 2009).

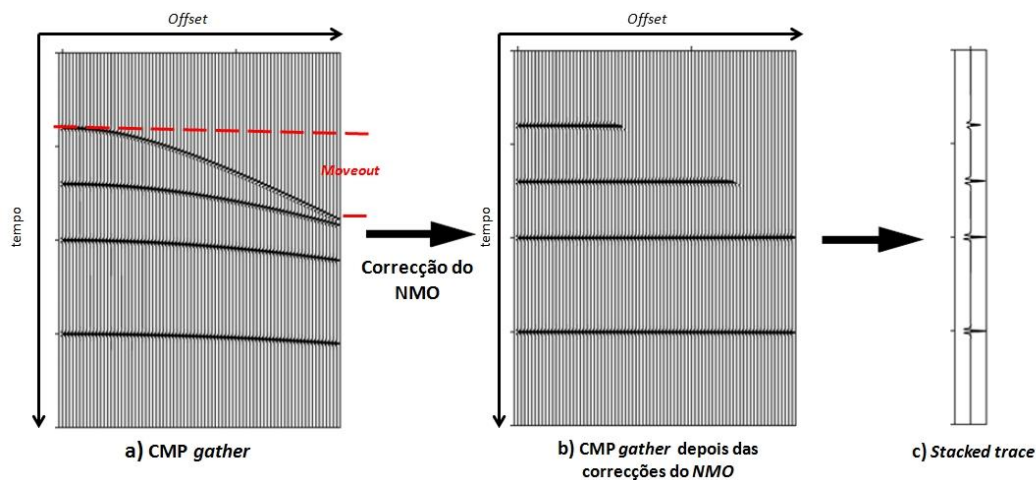


Figura 27 – a) Disposição dos traços por CMP *gather*; tempos de chegada para todos os *offsets* correspondem ao mesmo ponto comum para cada reflector; b) CMP *gather* depois de feitas as correcções de NMO; c) *stack* dos traços com sinal resultante melhorado (modificado de Kruk, 2003).

Na análise de velocidades, se as velocidades forem bem estimadas, as reflexões primárias ou do fundo do mar ficarão horizontalizadas (Figura 27 b e Figura 28 b); se as velocidades forem demasiado baixas, a hipérbole de reflexão tende a direccionar-se para cima (Figura 28 c); se forem demasiado altas, a hipérbole de reflexão tende a direccionar-se para baixo (Figura 28 d). Estes erros nas velocidades, nas secções sísmicas migradas podem causar o aparecimento de hipérbolos invertidas de difracções, o efeito *smile*, resultantes da sobremigração, ou então resultarem na submigração da secção.

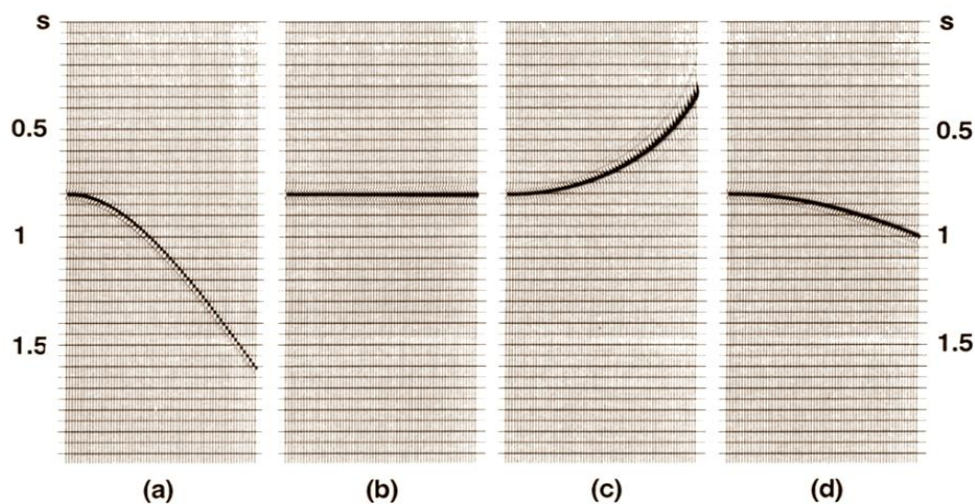


Figura 28 – Correcções de NMO (modificado de Yilmaz, 2001).

Existe ainda um passo adicional antes do *stacking*, que são as correcções das estáticas. Resultam do facto de o *moveout* não apresentar uma hipérbole de trajectória perfeita no CMP *gather*, resultado das irregularidades das velocidades próximo da superfície que causa de problemas de distorções estáticas (Yilmaz, 2001). É assim efectuada uma correcção de tempo fixo aplicada ao traço sísmico inteiro (Gadallah and Fisher, 2009), com o objectivo de mover os traços

individualmente para que as reflexões no CMP *gather* estejam alinhadas de forma precisa ao longo da hipérbole.

São correcções necessárias aplicadas individualmente aos tempos de reflexão de cada traço sísmico de modo a que a secção sísmica resultante dê uma verdadeira representação da estrutura geológica (Gadallah and Fisher, 2009).

O fluxo de processamento clássico normalmente termina com a migração. Este processo é utilizado para reposicionar as reflexões sísmicas nas suas verdadeiras posições no subsolo em profundidade e é necessário dado que no processamento convencional se assume que as interfaces são horizontais, o que não é geralmente verdade.

A presença de descontinuidades nas interfaces entre as várias camadas, por exemplo devido à presença de falhas ou a uma topografia irregular da superfície da camada, geram difracções, que aparecem como hipérboles nas secções sísmicas *stack*. Com uma migração adequada, baseada num modelo de velocidades realístico, a maioria das difracções nos dados são colapsadas. A migração tem tido resultados provados por melhorar a interpretabilidade e cartografia de áreas com estruturas complexas intensamente dobradas e falhadas. Este algoritmo de processamento também aumenta a resolução espacial dos dados (Yilmaz, 2001).

Todos os passos de processamento devem ser controlados através da visualização das secções sísmicas cruzadas para assegurar que a qualidade dos dados não é afectada.



## 4. Projecto Singapura 2014 – Caso de estudo

### 4.1. Enquadramento geológico

A Ilha de Singapura consiste numa grande ilha rodeada por várias ilhas mais pequenas, e encontra-se no extremo sul da Península Malaia, com uma área total de aproximadamente 700 km<sup>2</sup>, entre a latitude 1°09'N e 1°28'N e longitude 103°38'E e 104°06'E (Zhou and Cai, 2011).

É uma região de relevo moderadamente baixo, estando a maior parte do território situada entre 10 e 30 metros acima do nível médio das águas do mar. A área de maior relevo está situada na região centro norte de Singapura, a área de *Bukit Timah*, onde a maior colina ascende aos 163 metros acima do nível médio das águas do mar (Figura 29) (Zhou and Cai, 2011).

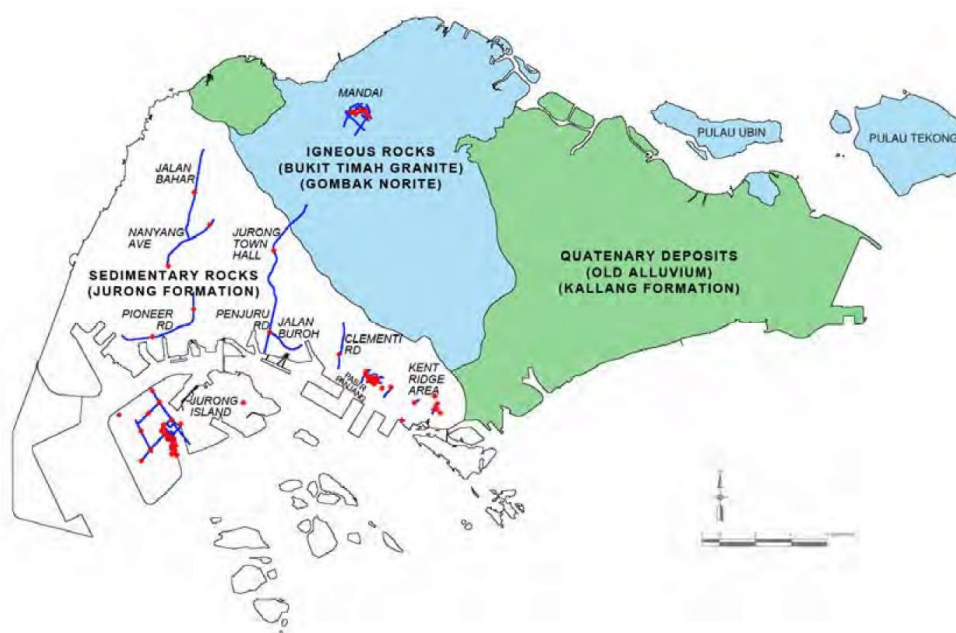


Figura 29 - Mapa geológico simplificado de Singapura (Zhou and Cai, 2011).

Em termos de geologia regional, Singapura é uma projecção meridional da geologia da Península Malaia, que é a extremidade da placa tectónica Euroasiática (Pitts, 1984 *in* Zhou and Cai, 2011).

#### 4.1.1. Evolução geodinâmica da região sudeste Asiática

##### 4.1.1.1. Proterozóico (2500 - 545 Ma)

Juntamente com a Índia e Austrália, o Este e o Sudeste do território Asiático formaram uma parte integral do antigo supercontinente *Rodinia*, há cerca de 1000 Ma. A fragmentação deste antigo continente há 700 Ma levou a Austrália, Índia, Antártida e os elementos que actualmente constituem o Sul de África e a América do Norte a colidirem e a aglutinarem-se para formarem o *Gondwana*, há cerca de 500 Ma (Figura 30). Subsolos do Proterozoico de terrenos a Sudoeste do continente Asiático são identificados por afloramentos limitados de xistos e gnaisses com idades radio-isotópicas do Proterozoico na Tailândia e Vietnam, por sequências sedimentares



relativamente não metamorfizadas de forma substancial no Sul da China e por zircões herdados de idades radio-isotópicas Proterozoicas em granitóides na península Malaia (Selley *et al.*, 2005).

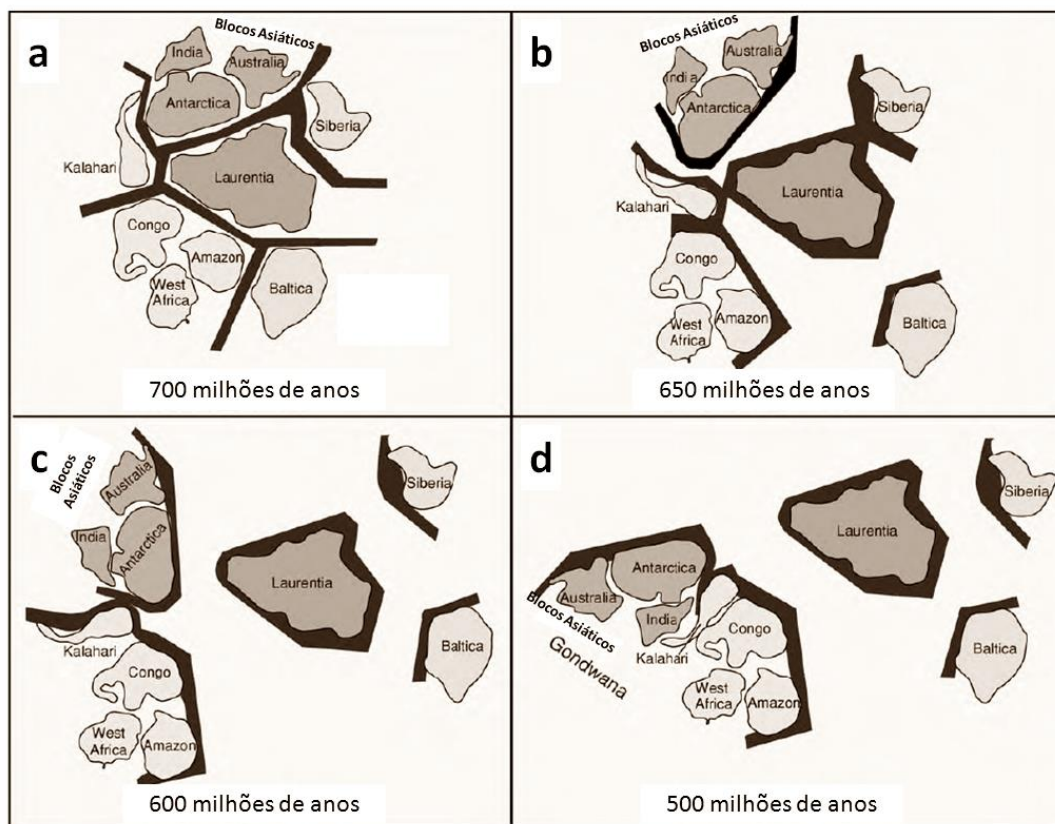


Figura 30 - Supercontinente *Rodinia* há 700 Ma e subsequente separação e formação do *Gondwana* há 500 Ma (modificado de Selley *et al.*, 2005). Os terrenos a partir dos quais se formou Singapura pertenciam ao *Gondwana*.

#### 4.1.1.2. Fanerozóico (545 - 0 Ma)

O Fanerozoico compreende as eras do Paleozóico, Mesozóico e Cenozóico, tempo em que ocorreu a colisão continental (amalgamação e acreção) datado por várias zonas de sutura (Figura 30) (Selley *et al.*, 2005).

##### 4.1.1.2.1. Câmbrico – Ordovícico – Silúrico (545 - 410 Ma)

O Este e o Sudeste Asiático fizeram parte do grande continente Indiano-Australiano, o *Gondwana*. Faunas desta idade em blocos Asiáticos e na Australásia definem as províncias de clima quente paleo-equatoriais Asiáticos e Australianos (Selley *et al.*, 2005).

##### 4.1.1.2.2. Devónico (410 – 354 Ma)

O Leste Australiano *Gondwana* continuou a residir nas baixas latitudes durante o Devónico mas rodado no sentido contrário ao sentido dos ponteiros do relógio. Esta rotação anti-horária espelha a rotação no sentido horário do Norte e Sul da China, Tarim, Indochina, o Este da Malásia e o Oeste de Sumatra, à medida que se separam do *Gondwana* como uma porção continental alongada. A separação desta porção de terreno do *Gondwana* deu origem ao oceano

*Palaeo-Theys* (Figura 31). Faunas do Devónico em solos Chineses continuam a ter algumas ligações Austalianas. Faunas endémicas do Devónico Inferior do Sul da China, incluindo algumas faunas de peixes e a fauna distintiva de braquiópodes *Chuiella* (Figura 31), são interpretadas como sendo resultado do processo de *rifting* e isolamento do Sul da China no *rifting* continental, e nesta altura não implicam necessariamente a separação continental do Sul da China dos outros blocos Chineses e da Austrália (Selley *et al.*, 2005).

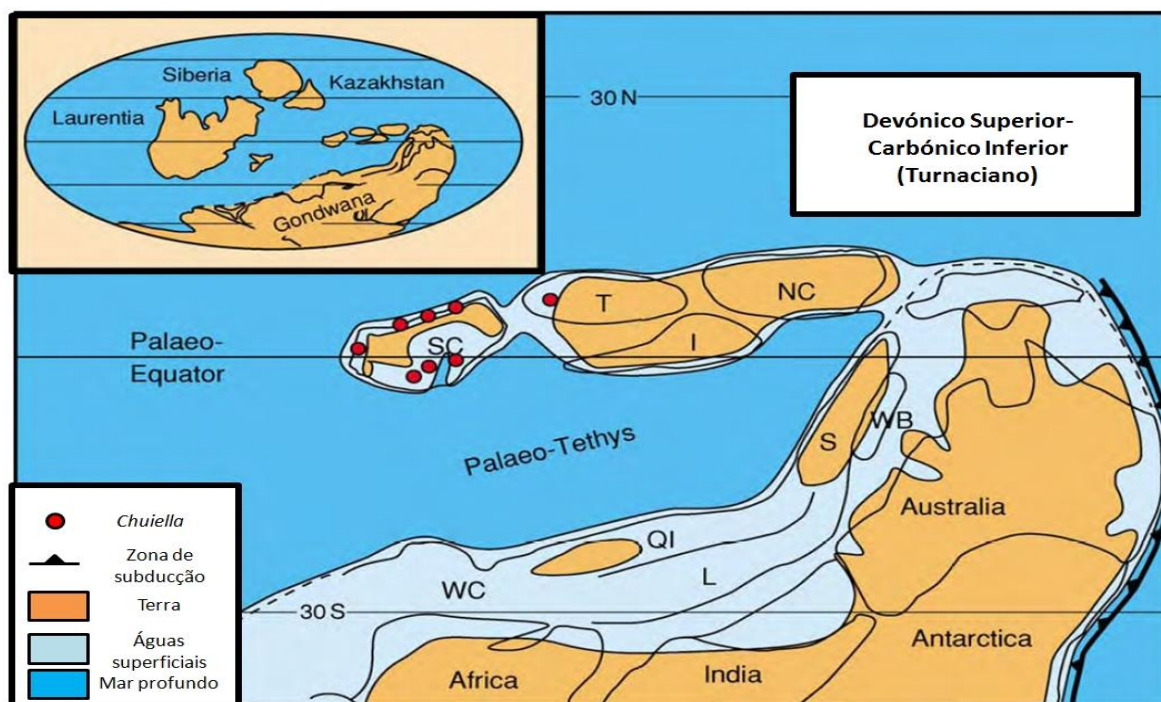


Figura 31 - Reconstrução da zona oeste do *Gondwana* para o Devónico Superior ao Carbónico Inferior, a mostrar posições do Este e Sul do bloco Asiático, distribuição da terra e do mar e a abertura do oceano *Palaeo Tethys*. Mostra ainda a distribuição do género de braquiópodes endémicos do Turnaciano *Chuiella*. NC, North China; SC, South China, T, Tarim; I, Indochina East Malaya West Sumatra; QI, Qiangtang; L, Lhasa; S, Sibumasu; WB, Western Cimmerian Continent (modificado de Selley *et al.*, 2005).

#### 4.1.1.2.3. Carbónico (354 – 298 Ma)

Durante o Carbónico, o *Gondwana* rodou no sentido horário e colidiu com a *Laurentia* a Oeste para formar o continente *Pangea*. Austrália, Sibumasu, Qiangtang, Lhasa e o Oeste de Burma ainda estavam anexados a nordeste do *Gondwana* e derivados das baixas latitudes do sul no Turnaciano - Viseiano (Carbónico Inferior) para altas latitudes no Nemuriano Médio Superior (Figura 32). Nesta altura, teve ainda início a maior glaciação do *Gondwana* que se estendeu até ao Pérmico Inferior (Selley *et al.*, 2005).

Existiram grandes mudanças globais climáticas e mudanças de configuração das placas durante este tempo, e houve mudança de condições quentes para frias na Australásia. Isto é reflectido na mudança de alta para a baixa diversidade da fauna na Australásia, especialmente a Este da Austrália, onde faunas endémicas de baixa diversidade se desenvolveram no Carbónico Superior. As faunas e as floras do norte e sul da China, Indochina, Leste Malaio, Oeste de Sumatra e Tarim são tropicais ou subtropicais do tipo *Cathaysian* ou *Tehyan* durante o Carbónico e não mostram qualquer afinidade com o *Gondwana*. Estes territórios já se tinham separado do *Gondwana* e estavam situados em baixas altitudes ou posições equatoriais durante o Carbónico

(Figura 32). A Indochina e o Sul da China colidiram e foram amalgamados dentro do *Tethys* durante o Carbónico Inferior ao longo da zona de sutura *Song Ma*, que é actualmente localizada no Laos e no Vietnam (Selley *et al.*, 2005).

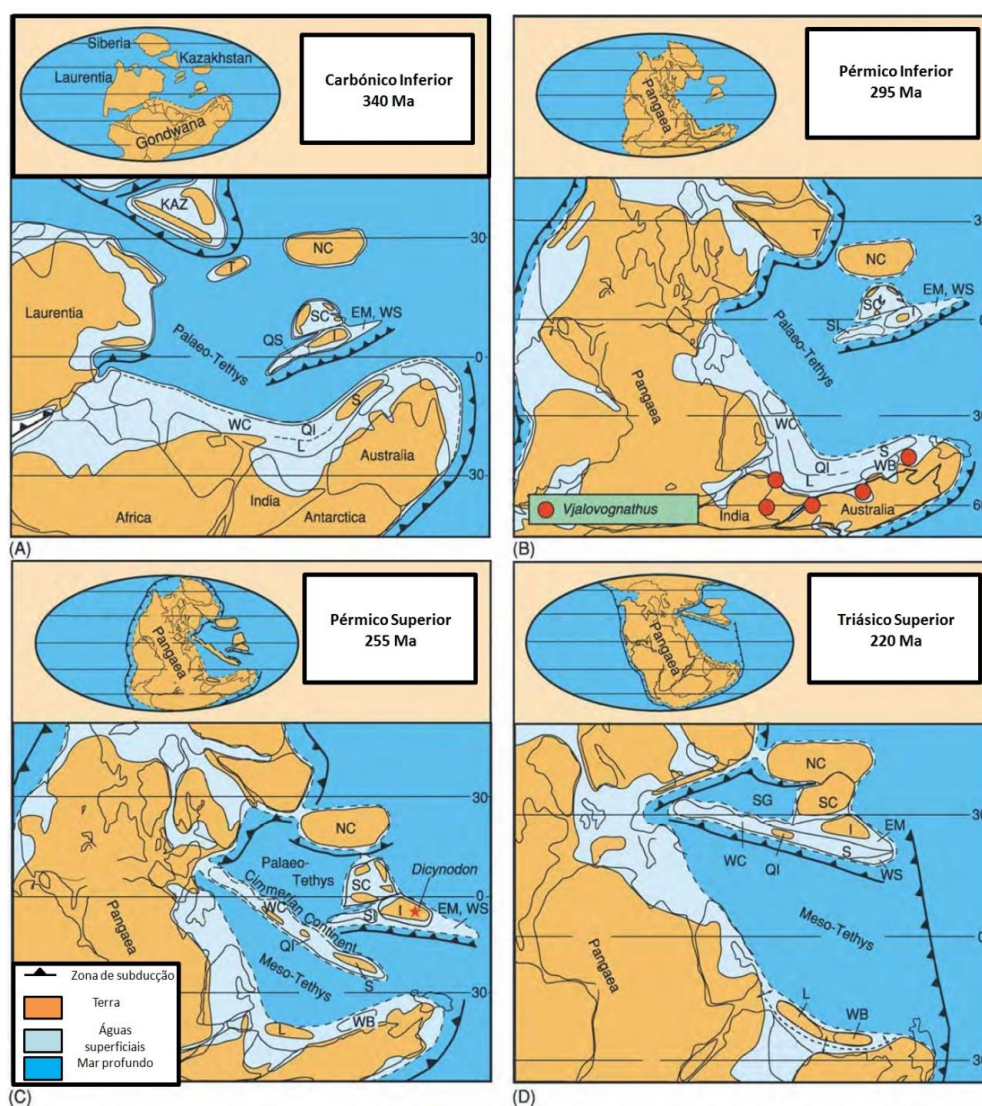


Figura 32 - Reconstrução paleogeográfica da região do Thetys. (A) Carbónico Inferior, (B) Pérmico Inferior, (C) Pérmico Superior, (D) Triásico Superior, a mostrar a posição relativa do Oeste e Sudeste Asiático e a distribuição da terra e do mar. São mostradas também a distribuição dos conodontes resistentes às águas frias *Vjalovognathus* do Pérmico Inferior e os *Dicynodontes* do Pérmico Superior, na Indochina. SC, South China; T, Tarim, I, Indochina; EM, East Malaya; WS, West Sumatra; NC, North China; SI, Simao; S, Sibumasu; WB, West Burma; QI, Qianglang; L, Lhasa; WC, Western Cimmerian Continent; KAZ, Kazakhstan; QS, Qamdo Simao; SG, Songpan Ganzi (modificado de Selley *et al.*, 2005).

Lençóis de gelo e glaciares estenderam-se ao longo de maior parte do *Gondwana* durante o Carbónico Superior; o gelo atingiu o ambiente marítimo da plataforma continental Índia-Australiano do *Gondwana*, e sedimentos glaciares marítimos foram depositados na plataforma continental a Este do *Gondwana*. Subdução por baixo do sul da China – Indochina no Carbónico levou ao desenvolvimento da bacia *back-arc* *Ailaoshan–Nan-Uttaradit*, actualmente representada pela Zona de Sutura *Ailaoshan and Nan-Uttaradit*, e à separação do *Terreno Simao* através da propagação do *back-arc* (Selley *et al.*, 2005).



#### 4.1.1.2.4. Pérmico Inferior (298 – 270 Ma)

Durante o Pérmico, a Austrália manteve-se nas altas latitudes do Sul. O gelo glacial continuou a alcançar o ambiente marítimo da margem Nordeste do *Gondwana*, e os depósitos sedimentares glaciares continuaram a ser depositados nos terrenos Sibumasu, Qiangtang e Lhasa, e as faunas e floras do clima frio caracterizavam estas regiões nesta altura (Figura 33). Durante o Pérmico Inferior (fim do Sakmariiano), a porção continental do *Cimmerian* separada da margem Nordeste do *Gondwana* e do oceano *Meso-Tethys* abriu através da propagação entre esta e o continente *Gondwana* (ver Figura 32 C) (Selley *et al.*, 2005).

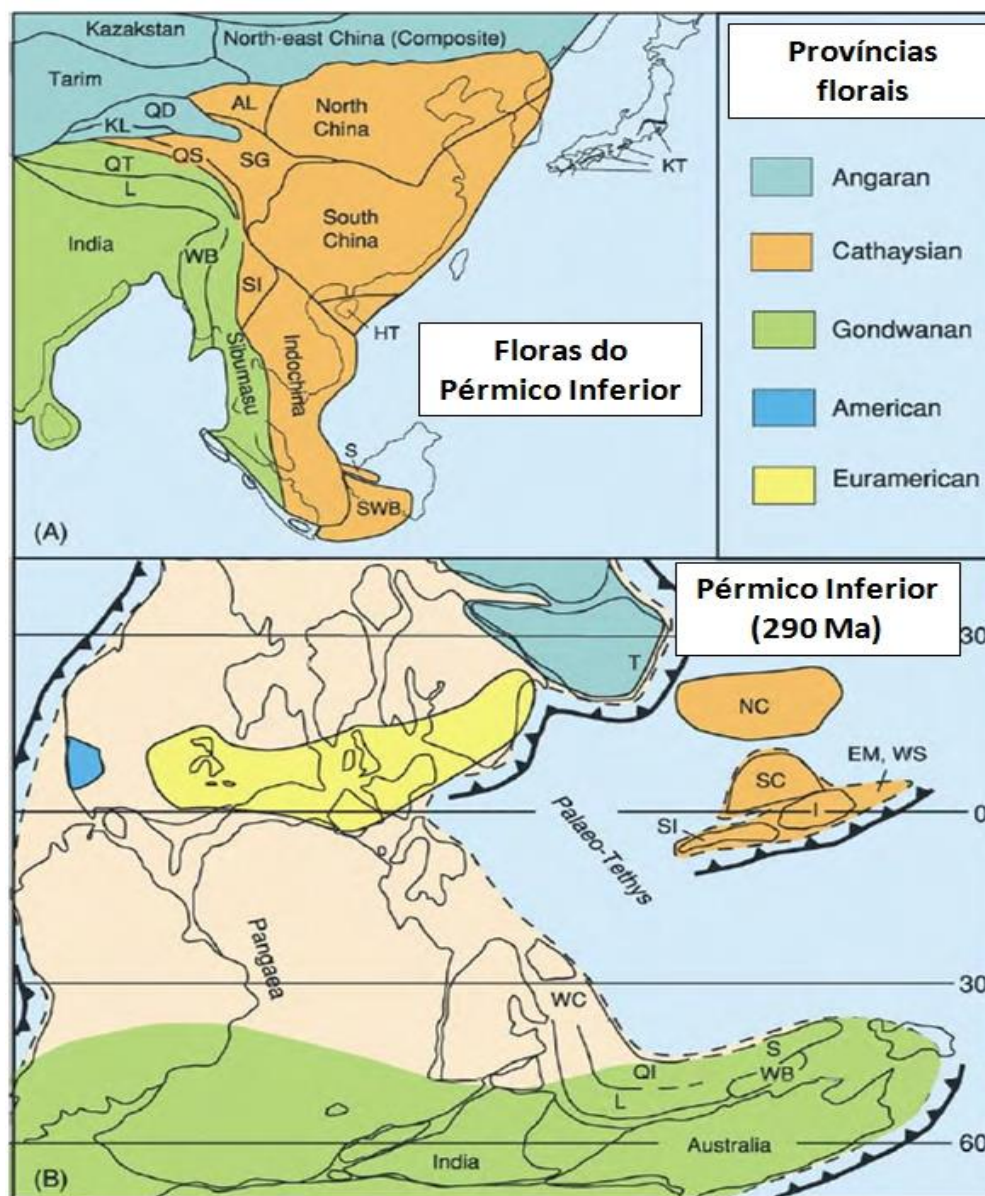


Figura 33 - Distribuição das províncias da Flora do Pérmico Inferior. (A) Mapa geográfico actual; KL, Kunlun; QD, Qaidam; AL, Ala Shan; QT, Qiantang; L, Lhasa; QS, Qamdo Simao; SG, Songpan Ganzi; WB, West Bruma; SI, Simao; HT, Hainan Island Terranes; S, Semitau; SWB, South West Borneo. (B) Mapa paleogeográfico do Pérmico Inferior; T, Tarim; NC, North China; SI, Simao; SC, South China; I, Indochina; EM, East Malaya; WS, West Sumatra; WC, Weste Cimmerian Continent; QI, Qiangtang; S, Sibumasu; L, Lhasa; WB, West Bruma (modificado de Selley *et al.*, 2005).

#### 4.1.1.2.5. Pérmico Superior (270 – 252 Ma)

No início do Pérmico Inferior os terrenos de Sibumasu e Qiangtang separaram-se do *Gondwana* e o *Meso-Tethys* abriu-se entre esta porção de continente e o *Gondwana*. O *Palaeo-Tethys* continuou a ser destruído pelas subducções em direcção ao Norte sob a *Laurasia*, Norte da China e amalgamados terrenos do Sul da China, Indochina e Este Malaio. Após separação e a sua mudança em direcção a Norte, os terrenos Sibumasu e Qiangtang inicialmente desenvolveram fauna característica do *Cimmerian*. O Norte e o Sul da China começaram a colidir durante o Pérmico Superior, e a conexão entre o continente *Pangea* e a Indochina, através do norte e sul da China, é indicada pela ocorrência do género *Dicynodon* no Pérmico Superior da Indochina (ver Figura 32 C). Sibumasu começou a colidir com a Indochina no Pérmico Superior, e a colisão continuou no Triásico Inferior. Deformações associadas a este evento e com a colisão do norte e Sul da China, é conhecida como orogenia Indosiniana (*Indosinian Orogeny*) no Sudeste Asiático e na China (Selley *et al.*, 2005).

#### 4.1.1.2.6. Triásico (253 – 205 Ma)

A Austrália estava numa latitude baixa-moderada a Sul, durante o Triásico. O Sibumasu e o Qiangtang colidiram e foram suturados para o terreno amalgamado Indochina-Sul da China. O Oeste do bloco de Sumatra foi empurrado em direcção a Oeste pela interacção da subducção da placa *Palaeopacifica* com a mesma direcção com subducções com direcção Norte do *Palaeo-Tethys* durante o processo de colisão Sibumasu-Indochina-Este Malaio e foi traduzido ao longo de uma grande falha de cisalhamento para a posição exterior do Sibumasu no Triásico Inferior. A colisão Norte-Sul da China estava quase completa, e rochas metamórficas de muito alta pressão foram exumadas ao longo da zona de sutura *Qinling-Dabie*. Sedimento proveniente do orógeno colisional do Norte e Sul da China depositado na bacia do complexo acrecionário *Songpan Ganzi* produzindo espessuras enormes de *Flysch* de turbiditos. A bacia *back-arc* *Ailaoshan-Nan-Uttaradit* foi fechada quando o *Simao Terrane* colidiu com sul da China-Indochina no Triásico Médio/Superior. Durante o Triásico Superior (Noriano), o Norte e Sul da China, Sibumasu, Indochina, este Malaio, oeste de Sumatra e *Simao* tinham fundido para forma *proto-East* e *South-east Asia* (ver Figura 32d) (Selley *et al.*, 2005). Durante a consolidação da colisão final, desenvolveram-se as três províncias graníticas mais importantes da região em termos económicos, por serem estruturas onde se formaram grandes depósitos de estanho (Figura 34).

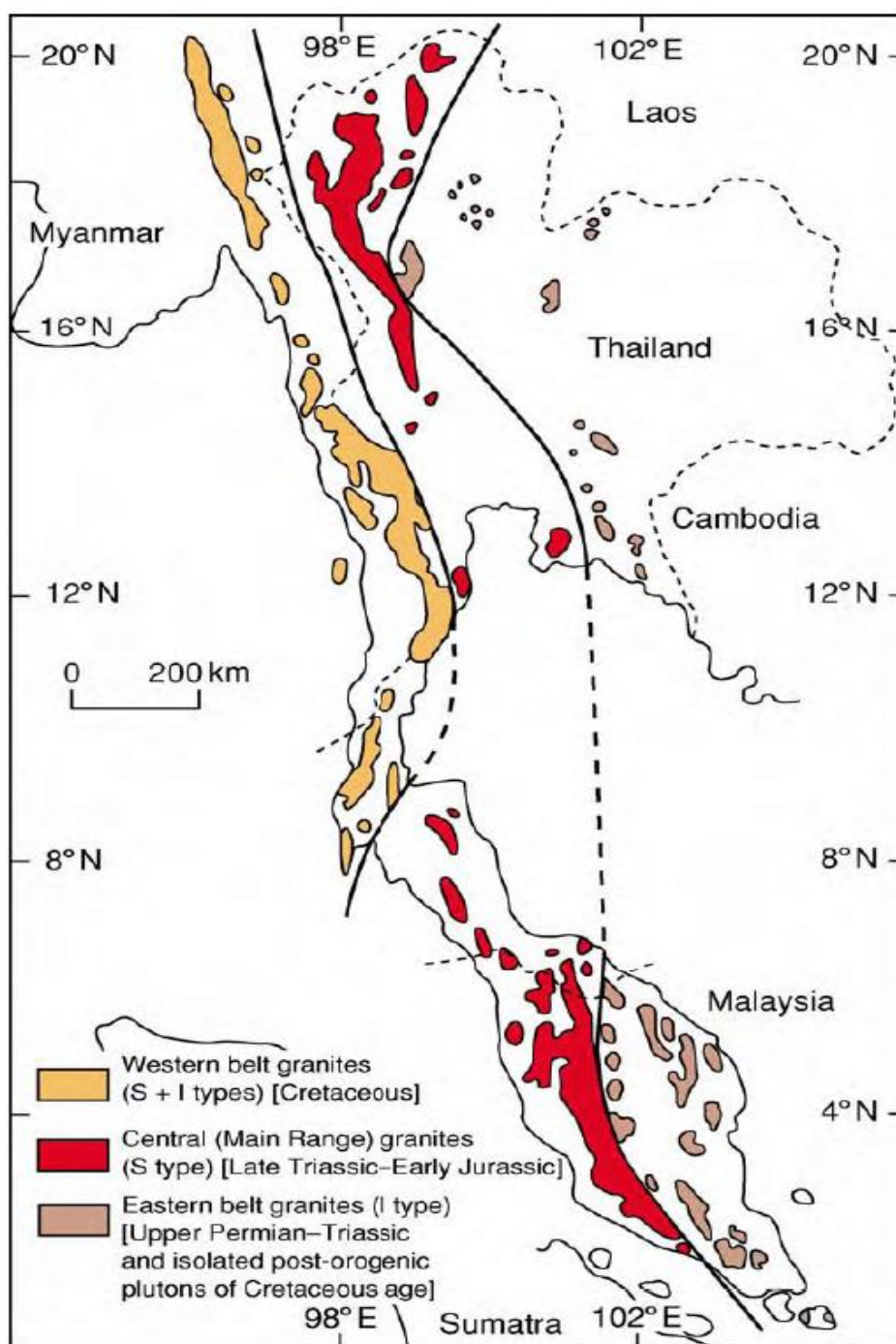


Figura 34 - As três províncias de granitoides do Sudeste da Ásia (de Selley *et al.*, 2005)

#### 4.1.1.2.7. Jurássico (205 – 141 Ma)

Durante o Jurássico, a Austrália manteve-se nas latitudes baixas-moderadas do Sul. O *rifting* e a separação de Lhasa, Oeste de Burma, Sikuleh, Mangkaliahat e Oeste de Sulawesi do Noroeste da Austrália ocorreu progressivamente de Oeste para Este durante o Triássico Superior e o Jurássico Superior. O oceano *Ceno-Tethys* abriu-se por trás destes territórios à medida que se foram separando do *Gondwana*. A junção final do norte da China à Eurásia (*the Yanshanian deformational orogeny*) teve lugar no Jurássico com o fecho do oceano *Mongol-Okhotsk*. O

período inicial do *rifting* antes da separação do supercontinente *Gondwana* também teve início no Jurássico (Selley *et al.*, 2005).

#### **4.1.1.2.8. Cretácico (141 – 65 Ma)**

O bloco Lhasa colidiu e foi amalgamado com a placa Eurásia no Jurássico Superior-Cretácico Inferior. O *Gondwana* separou-se e a Índia derivou para norte, fazendo um contacto inicial com a Eurásia no final do Cretácico. Este contacto inicial entre a Índia e a Eurásia é indicado por dados paleomagnéticos da cordilheira *Ninetyeast* e também através de ligações biogeográficas do Cretácico Superior, que incluem sapos e outros vertebrados. Os pequenos territórios de Oeste de Burma e Sikuleh foram também acrescentados ao Sibumasu durante o Cretácico. A Austrália começou por separar-se da Antártida e derivou em direcção a Norte, mas a ligação a Antártida manteve-se através da Tasmânia (Selley *et al.*, 2005).

#### **4.1.1.2.9. Cenozóico (65 – 0 Ma)**

A evolução Cenozóica do Este e Sudeste Asiático envolveu movimentos substanciais além de rotações das falhas de cisalhamento, rotações dos blocos continentais e placas oceânicas, o desenvolvimento e propagação de mares “marginais” e a formação de bacias sedimentares e de importantes reservatórios de hidrocarbonetos. Esta evolução foi essencialmente devida aos efeitos combinados das interacções das placas Eurasiáticas, Pacífica, e Indo-Australiana, e as colisões da Índia com a Eurásia e da Austrália com o Sudeste da Ásia (Selley *et al.*, 2005).

Vários modelos tectónicos têm sido propostos para a evolução da região no Cenozoico, que invocam diferentes mecanismos para a colisão entre a Índia e Eurásia e diferentes interpretações das rotações dos blocos continentais e placas oceânicas. Três mecanismos básicos foram propostos para o movimento em direcção a Norte da Índia para dentro da Eurásia. O primeiro envolve a subducção da Índia por baixo da Eurásia; o segundo envolve o encurtamento e aumento de espessura da crosta; e o terceiro mecanismo envolve grande extrusão lateral em direcção a Oeste e a rotação progressiva no sentido horário da China, Indochina e Arquipélago de Sunda (Sundaland) (Selley *et al.*, 2005).

Rotações horárias de blocos da crosta no Cenozóico são observadas na Indochina e Oeste da Tailândia, mas grandes rotações progressivas anti-horárias são observadas em Borneo e na Península Malaia. As rotações anti-horárias observadas em Borneo e na Malásia são contraditórias ao modelo de extrusão. A maioria dos modelos para a região negligencia a rotação no sentido horário da placa oceânica das Filipinas e/ou a rotação no sentido anti-horário de Borneo. Para o estudo da evolução geodinâmica da região durante o Cenozóico, o que reúne maior consenso é o modelo de reconstrução do Cenozóico proposto por Robert Hall, que tem em conta as rotações horárias da placa oceânica Filipina e rotações anti-horárias de Borneo e a Península da Malásia. (Selley *et al.*, 2005).

#### **4.1.2. Principais formações geológicas de Singapura**

Segundo Pwd (1976) e Dsta (2009), as rochas de Singapura consistem principalmente em quatro formações geológicas principais, ordenadas por idades geológicas do mais recente para o mais antigo, que são: as formações de granitos *Bukit Timah*, a formação *Sajahat* de arenitos com quartzo metamorfozados e argilitos, a formação *Gombak Norite*, e a formação *Jurong* de rochas

sedimentares (Zhou and Cai, 2011). No entanto, de acordo com Zhou & Cai (2011) existem diferenciadas mais duas formações além das existentes, que se sobrepõem as existentes, constituídas por depósitos superficiais, que incluem solos residuais da formação *Kallang* e do *Fort Canning Boulder*, e o *Old Alluvium*.

Os granitos de *Bukit Timah* (BT) formam a maior camada rochosa de Singapura e cobrem um terço da ilha de Singapura, distribuídos pela ilha principal, a ilha *Pulau Ubin*, e as áreas marítimas circundantes. O termo granito é utilizado de uma forma geral para todo conjunto de rochas ácidas incluído granito, *adamellite*, granodiorito, e híbridos intermédios e ácidos (principalmente de composição granodiorítica e diorítica) que resultam da assimilação de rochas básicas dentro do granito (ver Figura 29) (Zhou and Cai, 2011).

A formação *Sajahat* (S) é provavelmente a formação mais antiga em Singapura. É uma rocha sedimentar variavelmente metamorfizada contendo quartzito, arenitos e argilitos. Esta formação está principalmente distribuída por *Pulau Sajahat*, *Sajahat Kechilkong*, ao longo da costa Norte de *Pulau Tekong*, a zona de estudo, e zonas distantes a Oeste como *Tanjong Renggam* (Zhou and Cai, 2011).

O *Gombak Norite* (GN) (ver Figura 29) é um corpo de norite e rocha gabroicas com exposição no lado Oeste dos granitos de *Bukit Gombak* onde rochas gabroicas e noríticas estão bem expostas na maioria das pedreiras. São rochas de grão grosseiro e ricas em plagioclase com quantidades variáveis de minerais de piroxena, clino e orto-piroxena, surgindo como grãos intersticiais e conferindo uma textura intergranular a estas rochas (Zhou and Cai, 2011).

A formação *Jurong* (JF) (ver Figura 29) é uma formação de rochas sedimentares, sendo a formação mais recente de Singapura (Fontaine and Lee, 1993 in Zhou and Cai, 2011). Sobrepõe-se às formações anteriores, e cobre extensivamente um terço da área da ilha principal de Singapura. Extensas áreas da formação *Jurong* têm sido afectadas pelo metamorfismo resultante da actividade tectónica. O grau de metamorfismo é baixo, e continua a ser possível determinar as fácies que têm sido afectadas (Zhou and Cai, 2011).

A formação *Old Alluvium* (ver Figura 29) é predominantemente formada por depósitos terrestres do Pleistocénico Inferior e distribuídos na parte Oeste de Singapura, ocupando uma área que corresponde a um terço da ilha principal de Singapura (Burton, 1964; Ong *et al.*, 2007 in Zhou and Cai, 2011). Isto compreende principalmente areia grosseira com quartzo-feldespático argiloso e cascalhos (Zhou and Cai, 2011).

A formação *Kallang* inclui sedimentos marinhos e terrestres estabelecidos desde o Pleistocénico até a actualidade. Estes depósitos cobrem muito do plano costeiro, a zona imediata ao *offshore* e vales de rios profundamente incisados. Esta unidade sedimentar marinha é encontrada na parte Oeste de Singapura e ocorre sobre uma área que cobre cerca de um quarto da ilha de Singapura. A formação *Kallang* tem como constituinte principal argila marinha (Zhou and Cai, 2011). A argila marinha geralmente consiste em duas unidades normalmente referidas como *Upper Marine Clay* e *Lower Marine Clay*, que são separadas por uma camada de argilas intermédia rígida, largamente considerada ser a crosta dessecada da *Lower Marine Clay* (Eng, 2004; Arulrajah and Bo, 2008). As camadas da *Upper Marine Clay* e *Low Marine Clay* apresentam uma cor azulada acastanhada e consistem de depósitos orgânicos e partículas finas de areia; a camada intermédia de argila rígida é avermelhada devido à oxidação como resultado da exposição do fundo do mar à atmosfera durante a subida e diminuição do nível médio da água mar no passado geológico (Arulrajah and Bo, 2008).



#### 4.2. Aquisição, finalidade dos dados sísmicos e objectivos do processamento

Os dados sísmicos que foram objecto deste estudo fazem parte de um programa de investigação do solo e subsolo marinho na baía de *Pulau Tekong* em Singapura (ver Figura 3), realizado pela *YJP Surveyors* para fins geotécnicos, que foram posteriormente cedidos à *GeoSurveys* para fins académicos, como é o caso deste trabalho. Para este propósito a *YJP* contractou a *GeoSurveys* para o processamento dos dados de sísmica multicanal Sparker, adquiridos como o objectivo de se ter uma imagem do fundo do mar até 30 metros de profundidade abaixo do fundo, ou até ao maciço rochoso.

O objectivo do processamento consistiu em providenciar secções de reflexão sísmica de muito alta resolução (*UHRs*) para a interpretação das camadas geológicas e quaisquer estruturas geológicas relevantes até cerca de 30 metros de profundidade abaixo do fundo do mar ou até ao maciço rochoso, com uma resolução vertical de 50 centímetros ou melhor nos primeiros 5 metros de profundidade.

Os principais passos de processamento aplicados para alcançar os objectivos foram os seguintes:

- Desconvolução da assinatura;
- Desconvolução *pre-stack*;
- Filtragem de ruído com *filtros passa-banda*;
- Análise de velocidades em CMPs;
- Correções de NMO e *stacking* dos CMPs;
- Atenuação de múltiplos *post-stack* utilizando o procedimento *Zero-Offset DeMultiple*;
- Migração *Stolt post-stack* para recuperar a verdadeira geometria dos reflectores.

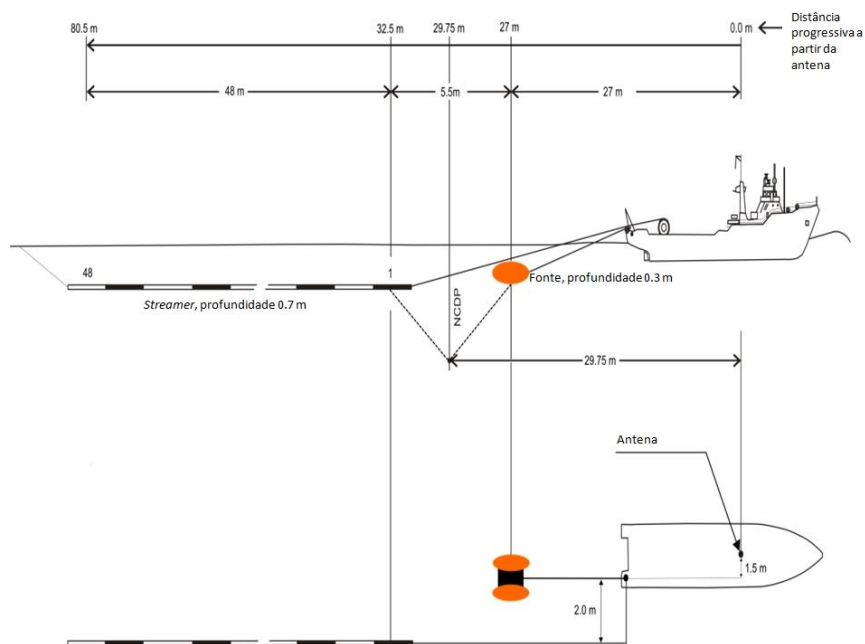
#### 4.3. Aquisição dos dados

Como já foi referido anteriormente, a aquisição de dados com o *Sparker* no local de pesquisa foi levada a cabo de 11 a 14 de Dezembro de 2014. Para a geração das ondas acústicas para a sísmica multicanal foi utilizado como fonte um *Sparker Geo-Source LW* de 200 eléctrodos de descarga negativa (*tips*) (Figura 35) alimentado por um *Geo-Spark pulsed power supply* de 1kJ. No que respeita aos receptores, foi utilizado um *streamer* de 48 canais com 1 metro de espaçamento entre canais e um *multitrace 48 seismic recorder*.

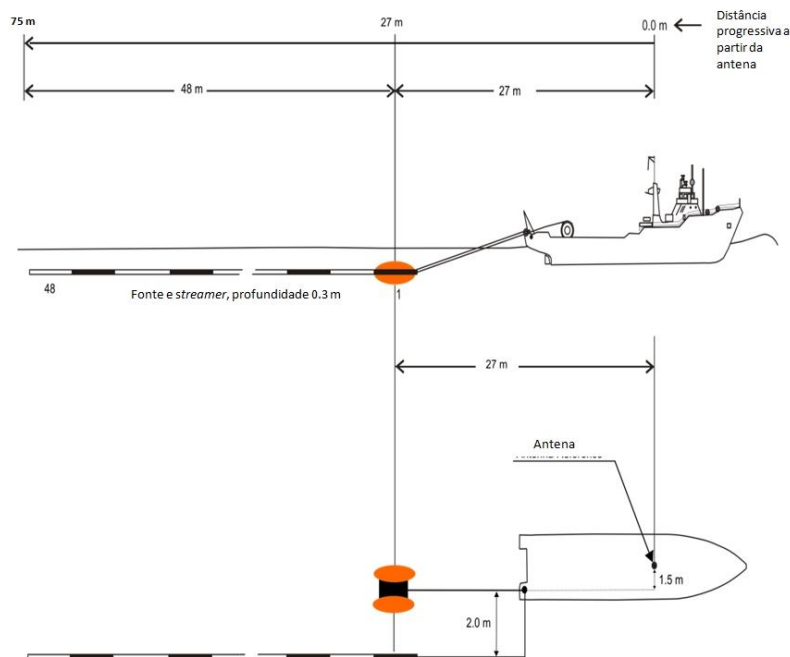


Figura 35 Fonte sísmica utilizada: Sparker Geo-Source 200 tips light weight.

O Geo-Source LW de 200 eléctrodos (*tips*) é constituído por 4 arranjos com 50 eléctrodos cada, fazendo um total de 200 eléctrodos, sendo a energia máxima recomendada para cada eléctrodo 5 Joules. Deste modo a escolha do Geo-spark PPS de 1kJ (1000 Joules) é mais que adequada.



(a)



(b)

Figura 36 - Plano de aquisição e diagrama dos *offsets* (sem escala) para a aquisição das linhas sísmicas. (a) Geometria 1 – geometria para as linhas adquiridas no dia 12 de Dezembro. (b) Geometria 2 - geometria para as linhas adquiridas nos dias 13 e 14 de Dezembro.

Exceder o máximo de energia por cada eléctrodo (*tip*) cria uma segunda oscilação na assinatura acústica, que reduz a resolução e provoca o aumento do desgaste mecânico e erosão dos eléctrodos.

O plano específico de aquisição e valores do *offset* da propagação sísmica utilizados, compreendem duas geometrias distintas, sendo uma geometria para o dia 12 (geometria 1) (Figura 36 a) e outra para os dias 13 e 14 de Dezembro (geometria 2) (Figura 36 b). O dia 11 foi o dia para arrumar o equipamento no navio, início da mobilização e execução de testes com o equipamento.

#### 4.3.1. Parâmetros de aquisição e identificação das linhas

Os parâmetros de aquisição são absolutamente fundamentais para se realizar o processamento correcto dos dados sísmicos.

No caso em estudo, o *streamer* utilizado tinha 48 canais, com um espaçamento entre canais de 1 metro, para um comprimento activo total de 47 metros. Os disparos foram feitos em tempo, com intervalos de 300 milissegundos; assumindo uma velocidade média do navio de 3.0 nós, corresponde a um espaçamento entre disparos de aproximadamente 0.5 metros. Foi obtido um *fold* nominal de CDPs<sup>1</sup> por *Bin* de aproximadamente 48, valor determinado aplicando a Equação 9. Os parâmetros de aquisição estão esquematizados na Tabela 1.

Quanto à identificação das linhas, cada nome de linha contém o número da referência do sistema de aquisição *multitrace* (por exemplo 033), seguido de um identificador que nos indica tratar-se de uma *inline* (“Line”) ou de uma *crossline* (“XLine”) e do número da linha. Por exemplo, a linha 033\_Line6 representa a *inline* número 6, correspondente ao ficheiro *multitrace* 033 do sistema de aquisição.

<i>Fonte</i>	<i>Geo-Source 200 LW</i>
Profundidade de reboque da fonte	≈ 0.3 m
Intervalo entre posições de tiro	300 ms (≈ 0.5 m)
Potência de operação	200 J
Fonte de energia	Geo-Spark 1 kJ
Cobertura de CDPs por <i>Bin</i>	≈ 48 fold
<i>Streamer</i>	48 Canais, (47 m comprimento activo)
Profundidade de reboque do <i>streamer</i>	
Geometria 1	≈ 0.7 m
Geometria 2	≈ 0.3 m
Espaçamento dentre canais	1 m
Comprimento do grupo activo	Elemento único
<i>Recorder</i>	<i>Multitrace</i>
Intervalo de amostragem	0.1 msec
Comprimento de registo	200 ms
Formato	<i>Geomarine proprietary binary format</i> (GRDF)

Tabela 1 - Geometria e parâmetros de aquisição de sísmica multicanal utilizados.

#### 4.3.2. Navegação e posicionamento

As linhas alvo de estudo são estabelecidas durante a fase de planificação. Em aquisição *offshore* a localização da fonte de energia e do *streamer* é feita simultaneamente com a operação de aquisição dos dados.

<sup>1</sup> Notação adoptada no *software* que corresponde aos CMPs, uma vez que durante o processamento assume-se que as camadas geológicas na área de estudo são horizontais.

As localizações da fonte e do *streamer* são determinadas em relação à posição da antena GPS do navio que fornece a localização do navio (ver Figura 36).

O posicionamento nesta campanha foi efectuado com um GPS diferencial (DGPS) *Trimble*, que foi directamente conectado ao *software* de aquisição sísmica. Os dados de navegação foram gravados em coordenadas UTM Zona 48, Hemisfério Norte, *datum* WGS84 (Tabela 2).

<b>Datum</b>	<b>World Geodetic System 1984</b>
Elipsoide	WGS 84
Semi-eixo maior (a)	6 378 137.00 m
Achatamento (1/f)	298.257223563
<b>Projecção gráfica</b>	
Projecção	Universal Transverse Mercator, Z48N
Latitude da Origem	0° N
Meridiano Central	105° E
Factor de Escala do Meridiano Central	0.9996
<i>Easting</i>	500 000
<i>Northing</i>	0

Tabela 2 - Parâmetros geodésicos WGS84, UTM Zona 48 Hemisfério Norte.

O princípio fundamental de funcionamento do DGPS consiste em comparar as coordenadas reais de um ponto fixo conhecido, a estação de referência situada *onshore*, com as coordenadas obtidas com um receptor de GPS nesse ponto. As diferenças observadas são utilizadas para calcular as correcções necessárias aos dados de posicionamento GPS. Essas diferenças são depois transmitidas ao GPS no navio de pesquisa, via rádio, o qual aplica as correcções aos dados (Parkinson, 2001).

#### **4.4. Controlo de qualidade**

A exibição adequada dos atributos dos dados ajudam o analista a compreender as características do sinal e do ruído dos dados obtidos e o efeito do passo incluído na sequência de processamento nos dados, facilitando deste modo especificações apropriadas dos parâmetros associados ao passo em causa (Yilmaz, 2001).

De forma a assegurar um processamento com sucesso, todos os dados adquiridos foram sujeitos a um rigoroso procedimento de controlo de qualidade da geometria de aquisição e qualidade do sinal.

##### **4.4.1. Análise do sinal e do ruído**

###### **4.4.1.1. Visualização dos dados em *shot* e *trace gather***

Feito o *upload* dos ficheiros de campo, tem início a análise dos dados, de forma a avaliar a qualidade do sinal. Nesta fase do trabalho os dados foram inspecionados no domínio dos registos de tiros e dos registos de traços (canal a canal, todos os tiros) para avaliar de uma forma geral a

Na Figura 37a fez-se o espectro de frequências no registo de tiro “morto”, que é um registo de tiro sem qualquer sinal e onde está registado apenas ruído. Serve para ver quais as frequências que representam o ruído. Na Figura 37b fez-se um espectro de frequências do sinal e do ruído em todos os registos de tiro, registo de tiro “morto” inclusive. Desta forma pode-se saber que frequências representam o sinal, dado que já se conhecem as frequências do ruído.



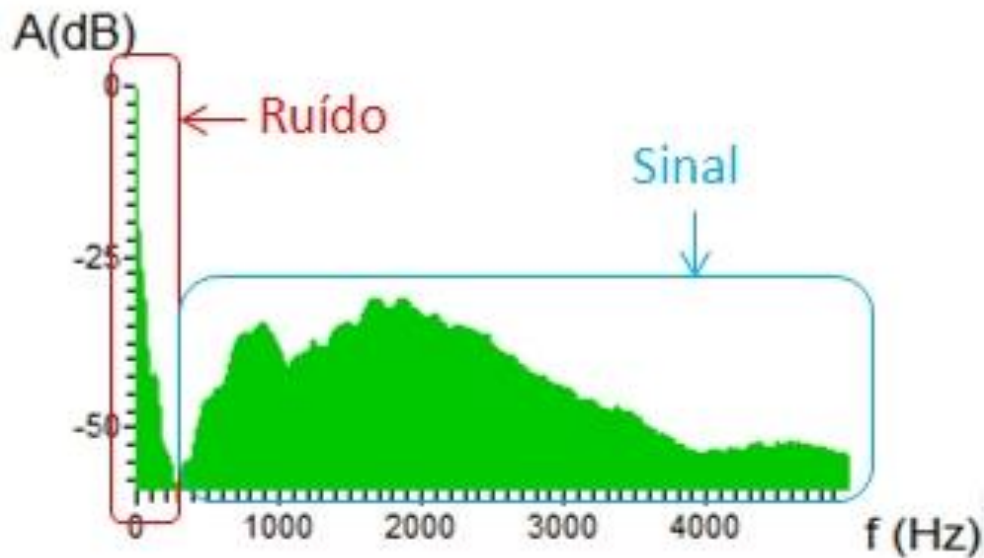


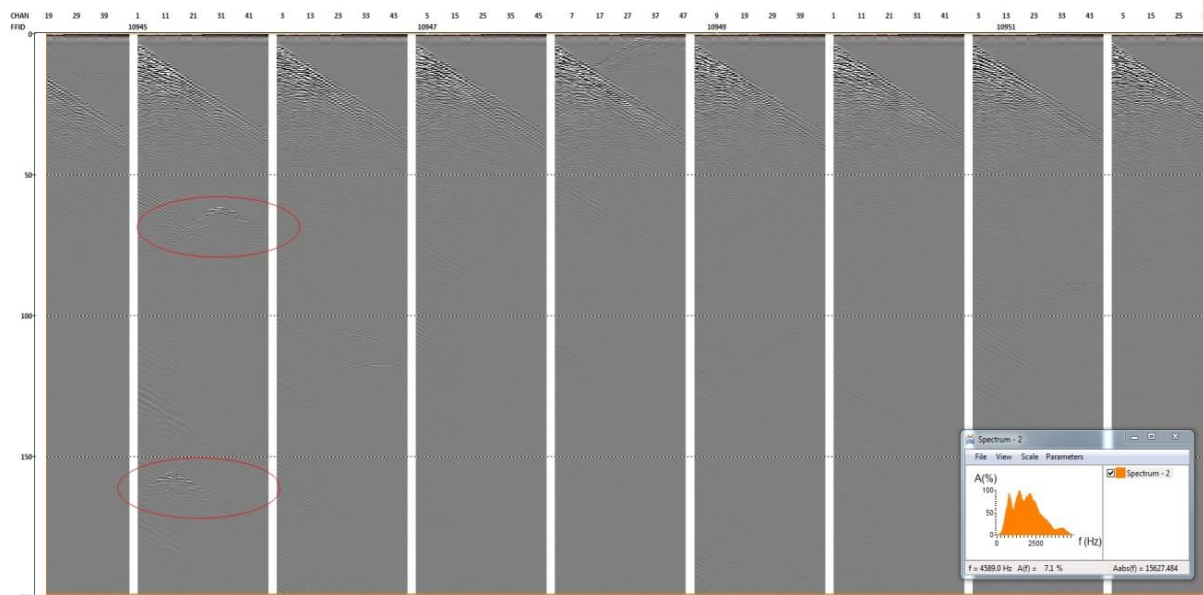
Figura 38 - Espectro de frequências (em decibéis) do sinal e do ruído do FFID 9270 ao FFID 9278 do *Raw data* da linha 026\_Line2.

No *shot gather* verificou-se a qualidade do sinal (*Shot QC*), o tipo de ruído presente e os problemas verificados durante o registo dos dados. No *trace gather* (*trace QC*) verificou-se a qualidade dos traços sísmicos para cada um dos canais.

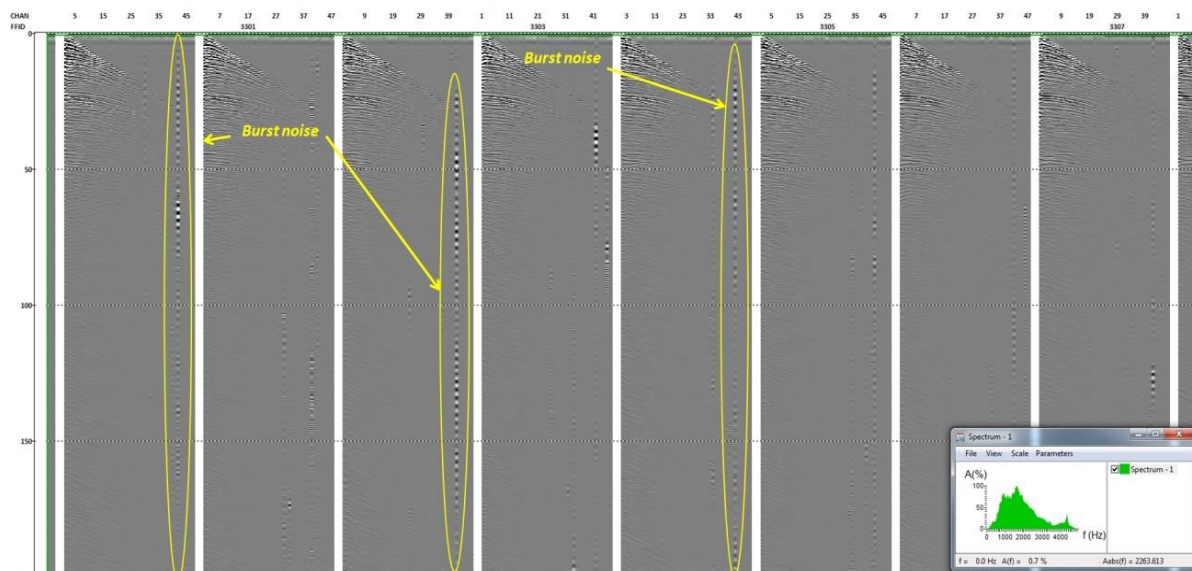
Feita a análise individual, linha a linha, praticamente todas as linhas apresentam:

- Ruído coerente associado ao funcionamento do navio em todos os registos de tiro, caracterizado pela presença de artefactos com *declive* semelhante ao *declive* da onda directa;
- Ruído incoerente repetitivo nalguns registos de tiro de algumas linhas, associado a actividades que decorriam nas proximidades do local de aquisição - ruído sob forma de hipérboles que aparecem esporadicamente nos registos de tiro (Figura 39 a);
- Presença com alguma frequência de *burst noises* em algumas linhas, visíveis nos *trace* e nos *shot gathers*, causados pela ascensão do *streamer* à superfície e consequente mudança de pressão, dando origem a um aumento momentâneo de energia (*spike*) nos sensores piezoeléctricos dos receptores. Dificuldades no reboque do *streamer*, variação da velocidade de reboque, o direccionamento do navio e a má distribuição dos pesos ao longo do *streamer* são a origem provável deste problema (Figura 39 b);
- De uma forma menos frequente observou-se ruído associado ao movimento do cabo nalgumas linhas, causado pelo atrito da zona lateral do cabo em contacto com a água e pela ondulação. Aparece no *shot gather* sob forma de hipérboles em intervalos de tempo constantes.





(a)



(b)

Figura 39 - Exemplo de alguns tipos de ruídos identificados; (a) *Burst noise* nos *shot gathers* do FFID 3300 ao FFID 3301 da linha 036\_Line11 e respectivo espectro de frequências; (b) Ruído associado a actividades nas proximidades da zona de aquisição no *shot gather* do FFID 10944 ao FFID 10952 da linha 026\_Line2 e respectivo espectro de frequências. Escala vertical em milissegundos (TWT).

Além destes vários tipos de ruído detectou-se também um ligeiro atraso de 0.1 milissegundos dos primeiros 24 canais em relação aos restantes 24 canais em todos os registos de tiro de todas as linhas em estudo. Portanto, entre os canais 24 e 25 existe um desfasamento entre traços. Este problema (Figura 40) deve-se a uma falha de sincronização do *multitrace 48 seismic recorder*.

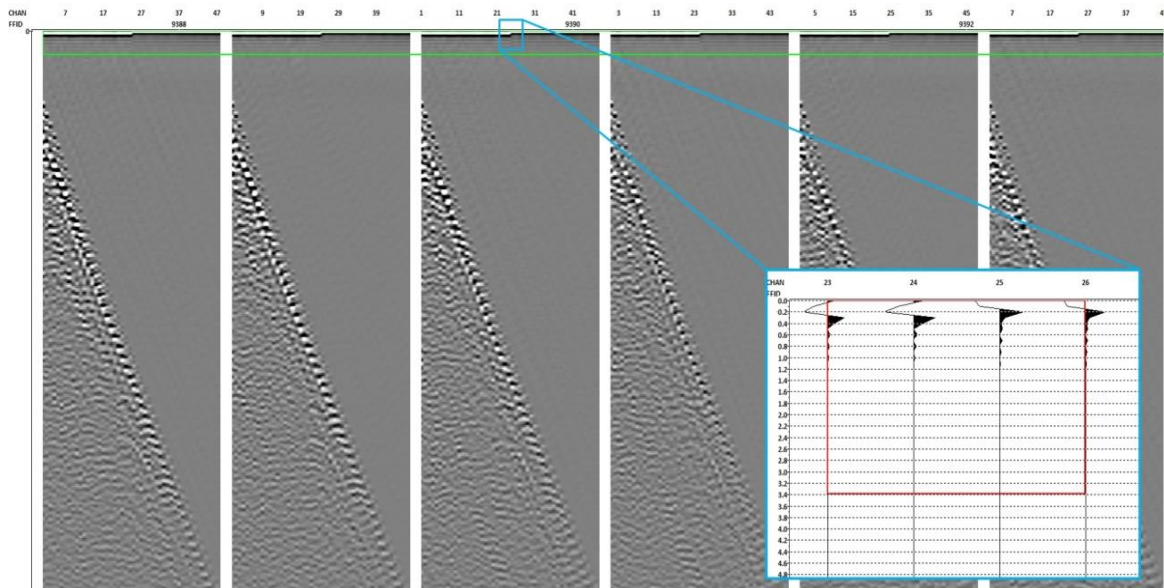


Figura 40 - Shot gathers do FFID 9388 ao FFID 9393 da linha 026\_Line2, onde se pode verificar o atraso de 0.1 milissegundos do traço sísmico do canal 24 em relação ao canal 25. Escala vertical em milissegundos (TWT).

#### 4.4.1.2. Análise espectral

Comparou-se a resposta espectral dos dados com a *wavelet* de referência obtida das reflexões do fundo mar numa secção sísmica *stack*, com o objectivo de assegurar a estabilidade do sinal registado em ambos tanto domínio de tiros como de traços (Figura 41).

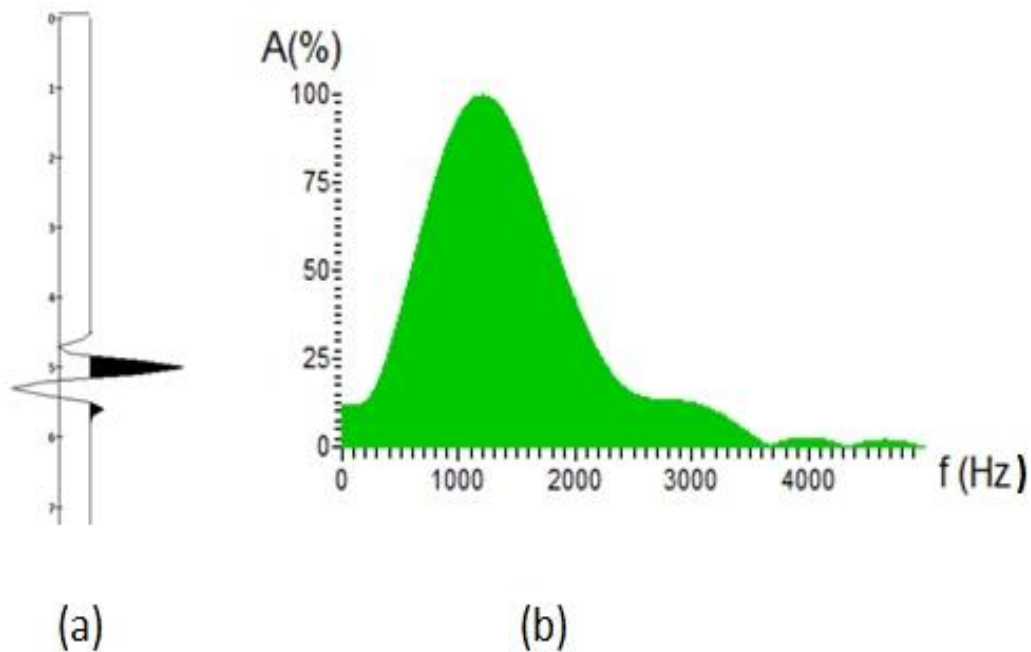


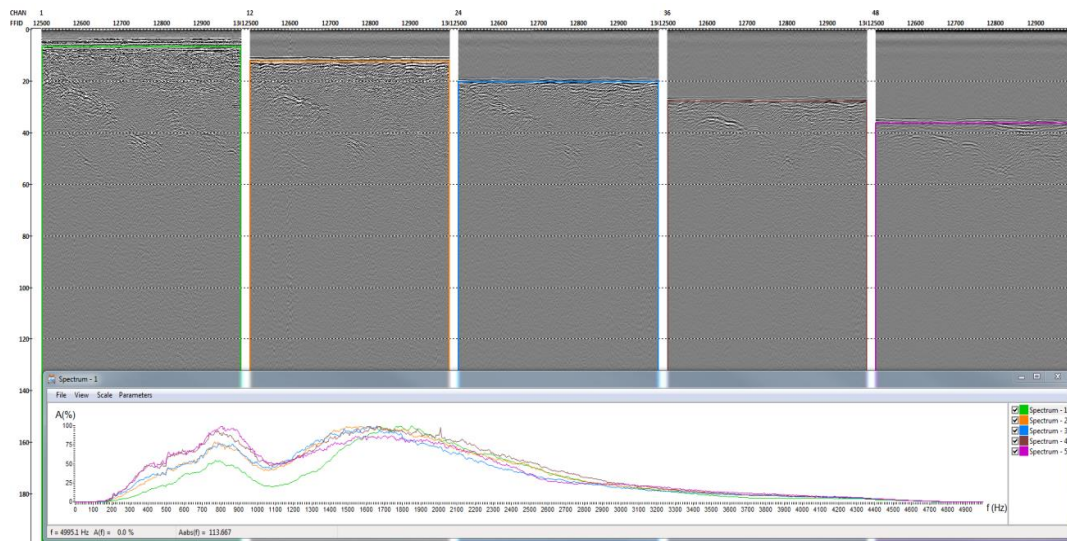
Figura 41 - (a) Wavelet correspondente à assinatura da fonte (*sparker*) a disparar a 200J (escala vertical em milissegundos); (b) espectro de frequências da wavelet (em %), com frequência de amostragem de 10000 Hertz.



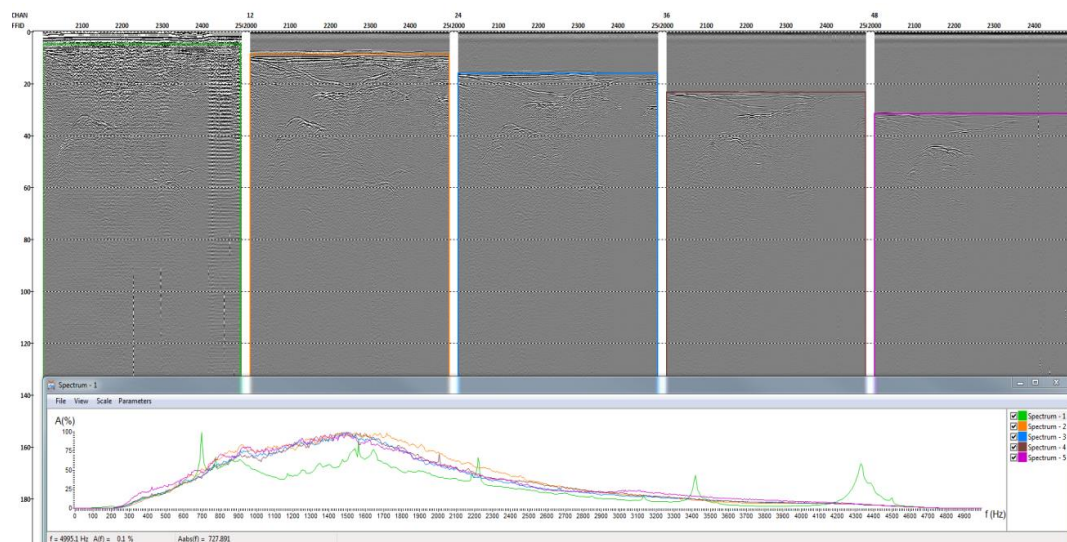
A qualidade do sinal nos vários registos de tiros (*shot gathers*) foi mais ou menos constante o que indica um comportamento estável da fonte, principalmente nos dados adquiridos com a segunda geometria (ver Figura 36). Nos *trace gathers* observou-se contudo uma grande variação do sinal, provavelmente devido à profundidade irregular de reboque do *streamer*.

Foram também feitas análises da resposta espectral, canal por canal, para verificar a estabilidade do sinal registado, nomeadamente nos canais 1, 12, 24, 36 e 48. A Figura 42 ilustra esta análise para duas linhas adquiridas com diferentes geometrias, geometrias 1 e 2 (Figura 36).

Em média, em todas as linhas o canal 1 apresenta maior instabilidade de acordo com os espectros de frequências, apresentando um comportamento diferente em relação aos restantes canais amostrados. Verificou-se também que o *burst noise* é mais frequente no canal 42 da maior parte das linhas.



(a)



(b)

Figura 42 - Análise dos espectros de frequências para os canais 1, 12, 24, 36 e 48, para as linhas: (a) 027\_Line3 adquirida com a geometria 1; (b) 037\_Line1, adquirida com a geometria 2. Escala vertical em milissegundos (TWT).

Na análise do espectro de frequências da linha 027\_Line3 adquirida com a geometria 1 (Figura 42 a) foi identificado um *ghost*, do *streamer* neste caso, através de uma frequência característica de um *notch* aos 1100 Hertz, em todos os canais. Isso indica que o *streamer* não está a uma profundidade adequada nesta geometria, ao contrário da análise do espectro de frequências da linha 037\_Line1 (geometria 2) onde o *notch* é quase imperceptível, excepto para o canal 1 (Figura 42 b).

O *ghost* do *streamer* (receptor) é um evento directamente relacionado com a geometria de aquisição, que ocorre devido ao forte coeficiente de reflexão na interface ar/água que causa quase total reflexão da onda sísmica, dando origem ao *ghost* registado pelos receptores.

#### **4.4.2. Avaliação do impacto das condições de operação na qualidade do sinal multicanal**

O método de campo para a aquisição de dados de reflexão sísmica varia consideravelmente, dependendo das condições meteorológicas no mar, da complexidade geológica e da acessibilidade da área (Sheriff and Geldart, 1995). De um modo geral, campanhas sísmicas são planeadas para serem adquiridas em condições meteorológicas calmas e favoráveis, para minimizar a quantidade de ruído registado juntamente com o sinal pretendido. Este ruído é maior com o aumento da agitação do mar e actividades periféricas à zona de pesquisa que podem condicionar os trabalhos, desde a presença de outras embarcações, que podem dificultar a manobra do navio, criam ondulações, ao ruído dos próprios motores e ainda à possibilidade de destruição do equipamento, grandes obras que envolvam grandes maquinarias, e outras condicionantes. A maior parte dos clientes especifica a quantidade de ruído tolerável durante a aquisição dos seus dados.

A preparação de uma campanha de aquisição sísmica *offshore* é uma fase crucial e muito importante para o sucesso da pesquisa. Uma boa preparação tende a diminuir o impacto que as condições de operação têm na qualidade dos dados a adquirir. Sendo uma aquisição feita em águas superficiais a variar entre 2 e 10 metros de profundidade torna-se numa campanha de aquisição ainda mais complexa.

Dos dados de sísmica multicanal processados no âmbito deste trabalho, a maior parte apresenta baixa qualidade em bruto. A geometria adoptada, principalmente no primeiro dia, as variações na profundidade de reboque do *streamer*, o direccionamento do navio e dificuldade em manter o *streamer* em linha recta, assim como problemas de sincronização e as baixas profundidades da área de aquisição são algumas das causas associadas à baixa qualidade dos dados em bruto.

##### **4.4.2.1. Controlo da geometria de aquisição**

O *offset* mínimo (distância da fonte ao primeiro canal) não deve ser maior que a profundidade da secção de interesse menos profunda. Ter os hidrofones suficientemente longe do ruído gerado pela fonte às vezes dita uma maior distância, mas isso pode causar perda de dados úteis na zona superficial. O *offset* máximo (distância da fonte ao hidrofone mais distante) deve ser comparável à profundidade máxima da zona de pesquisa (Sheriff and Geldart, 1995).

No primeiro dia de aquisição os valores da geometria (ver Figura 36 a) não estavam de acordo com os valores que seriam ideais, tendo valores de *offset* mínimo superiores a 2 metros (valor ideal) refletindo-se na perda de qualidade do sinal nas secções sísmicas em relação às

secções sísmicas adquiridas com a geometria do segundo e terceiro dia de aquisição (ver Figura 36 b). Quanto ao *offset* máximo de 48 metros, tem como consequência igualmente a perda de informação de eventos que ocorrem a baixas profundidades e ainda a perda de amplitudes nos canais à medida que vão ficando mais afastados da fonte; segundo Sheriff and Geldart (1995), esta perda de informação deve-se às diferenças de NMO, tornando-se difícil distinguir reflexões primárias dos múltiplos e outros ruídos coerentes.

Fazendo-se uma comparação entre linhas de dias de aquisição com geometrias distintas, além da perda de informação nos canais mais afastados da fonte mais acentuada nos dados do primeiro dia de aquisição, verifica-se ainda a diferença nas secções sísmicas dos tempos de chegada onda directa e a existência mais acentuada do *ghost* do *streamer* nas linhas adquiridas no primeiro dia.

O *ghost* mais acentuado nos dados adquiridos com a geometria 1 deve-se ao facto de o *streamer* não ter sido calibrado para a profundidade de reboque adequada. Como consequência: não existe uma interferência construtiva entre o *ghost* e as reflexões primárias, acabando por duplicar o sinal como se pode verificar na Figura 43.

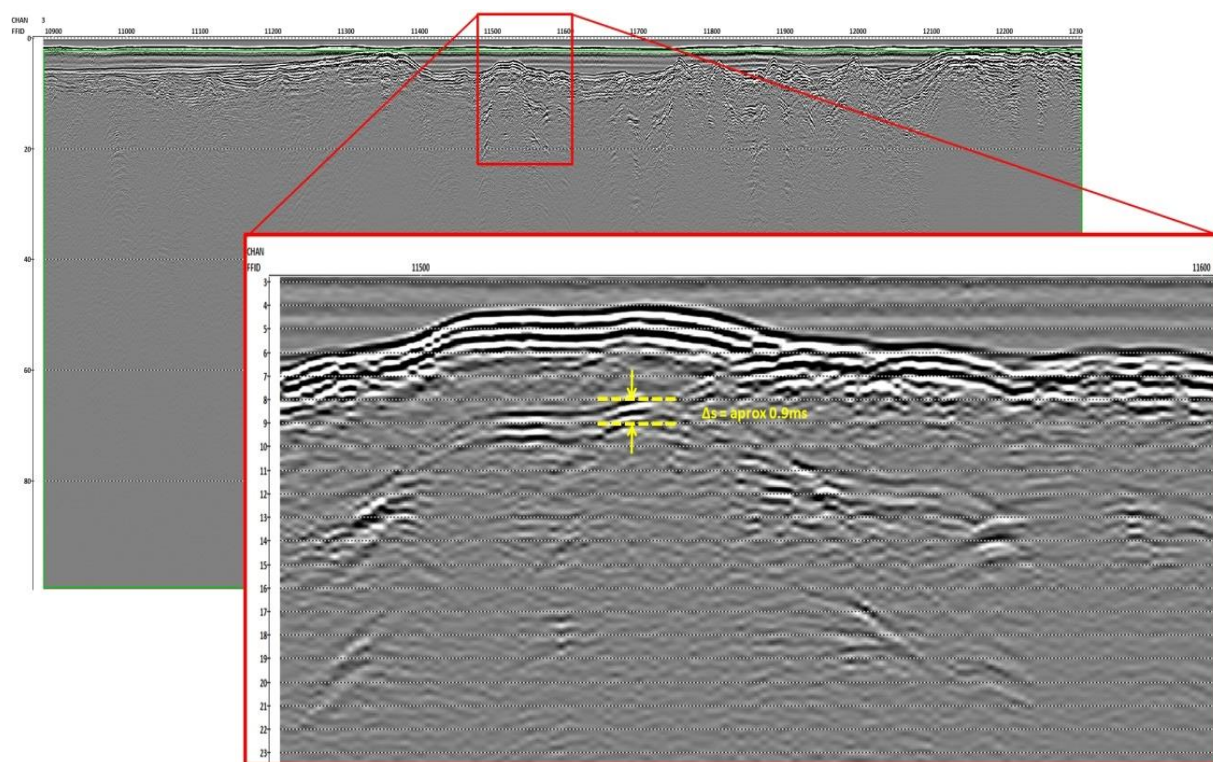


Figura 43 – Exemplo do *ghost* do receptor observado nos dados.

Para calibrar a profundidade a que se deve rebocar o *streamer* de forma a ter um *ghost* com interferência construtiva no sinal, “afunda-se” o primeiro canal adicionando pesos ao mesmo e mantém-se o último canal próximo da superfície, e efectuem-se disparos. A profundidade em que estiver o canal que apresentar um *notch* menos perceptível, será a profundidade a adoptar para a campanha de aquisição.

Para determinar a profundidade a que se encontra o *streamer*, conhecida a frequência do *notch* ( $f$ ) (ver Figura 42) utilizam-se as Equações 12 e 13, onde  $V$  é a velocidade de propagação das ondas acústicas na água.

$$Ghost\ gap\ (ms) = \frac{1}{f} \times V \quad \text{Equação 12}$$

$$Profundidade\ do\ streamer\ (m) = \frac{Ghost\ gap}{2} \quad \text{Equação 13}$$

Não sabendo a frequência do *notch* e sabendo-se o intervalo de tempo ( $\Delta s$ ) em que o sinal é duplicado pelo *ghost* na secção sísmica (Figura 43), inicialmente determina-se essa frequência (Equação 14) e posteriormente utilizam-se as equações anteriores (Equação 12 e Equação 13).

$$f = \frac{1}{\Delta s} \quad \text{Equação 14}$$

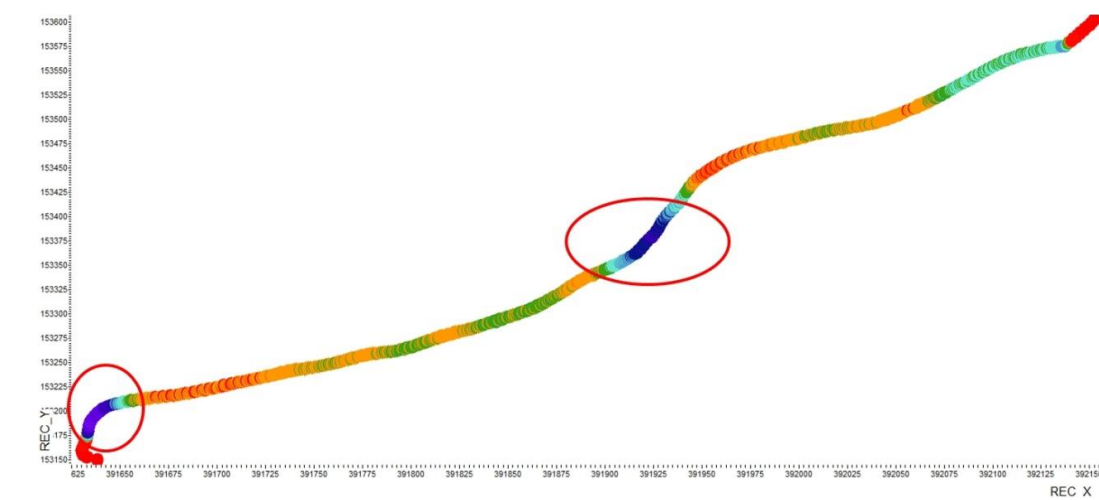
Aplicando as Equações 12,13 e 14, a profundidade de reboque do *streamer* calculada para o exemplo da Figura 43 foi de 0.7 metros aproximadamente, profundidade esta que foi utilizada para a aquisição dos dados na geometria 1.

Esta falha de geometria foi retificada no segundo e terceiro dia de aquisição com a introdução da geometria 2, com o *offset* mínimo reduzido e o reboque da fonte e do receptor à mesma profundidade de 0.3 metros.

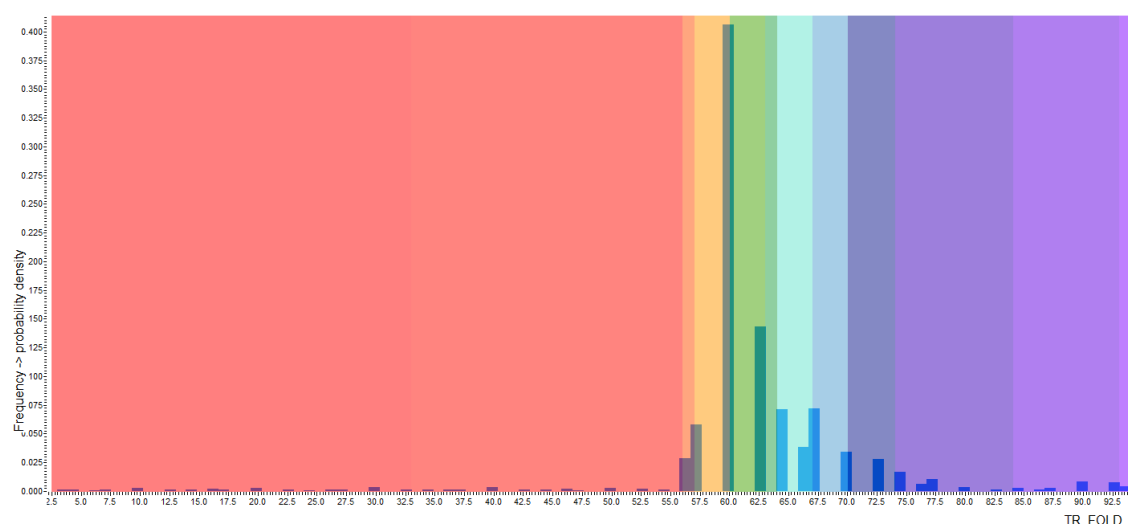
#### 4.4.2.2. Rumo do navio – *Steering and line keeping*

Correntes de água, variações na profundidade da água, navios pesqueiros e outras obstruções são os grandes obstáculos à aquisição sísmica marinha, tornando difícil manter o *streamer* em linha ou à profundidade ideal. O direcionamento do navio durante a aquisição em águas pouco profundas e em zonas de transição marítimo, no âmbito deste trabalho, afectou bastante a qualidade dos dados, principalmente devido à limitada manobrabilidade do navio. Estas dificuldades de manobras são visíveis principalmente no número de cobertura múltipla (*fold*) por CMP nalgumas linhas, que passa praticamente para o dobro do que era espectável principalmente em zonas em que houve mudança de direcção, grande diminuição de velocidade e em zonas onde o navio de aquisição encalhou (Figura 44).

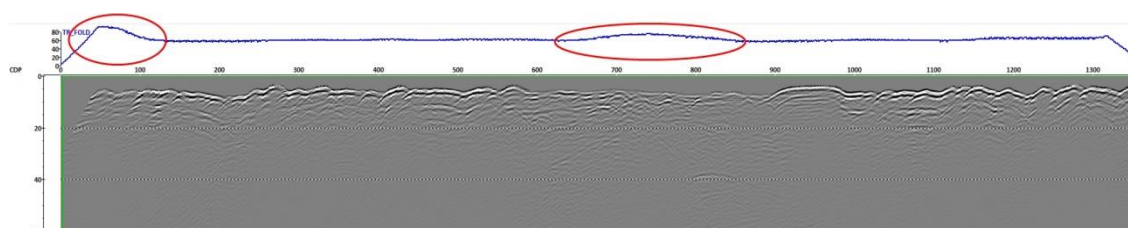
Veja-se como exemplo a 026\_Line2, feito um *crossplot* da linha, utilizando as coordenadas dos posicionamento do *streamers* em x e y (Figura 44 a) observa-se a posição do *streamer* durante a aquisição, e a interpretação da escala de cor permite concluir que as zonas assinaladas pelos círculos a vermelhos (cor violeta no gráfico) são zonas onde se observam números de *folds* superiores a 70, muito acima do número esperado, zona em que se verifica mudança de direcção do navio. Esta conclusão é sustentada pelo histograma do número de *folds* (*TR\_FOLD*) em função da frequência e ainda a escala de cor (Figura 44 b).



(a)



(b)



(c)

Figura 44 - Linha 026\_Line2; (a) *Crossplot* da linha com as coordenadas  $x$  e  $y$  dos CMPs, com a escala de cores a representar a variação do número do *fold*; (b) Histograma do *TR\_FOLD* em função da frequência, com a escala de cor a variar em função do número de traços por CMP; (c) Parte da secção sísmica da linha com o gráfico do número de *folds* em função do CDP. Escala vertical em milissegundos (TWT).

O número de *folds* pode ser também verificado, adicionando um gráfico do *header* (*TR\_FOLD*) a um secção sísmica em *CMP gather*. Este número aumenta porque apesar de se estar a disparar num intervalo de tempo constante, a velocidade diminui nas curvas (não é constante); portanto, ao fazer a conversão deste intervalo entre disparos para distância passa-se a ter um

valor inferior a 0.5 metros, aumentando desta forma o número de traços por cada CDP, Principalmente nas mudanças de direcções

Este mau direccionamento do navio pode estar directamente associado a baixas profundidades das águas na zona de aquisição ou a trânsito de outras embarcações, o que dificulta a manobrabilidade do mesmo.

#### **4.4.2.3. Velocidade do navio – *Speed through the water***

A velocidade do navio é muito importante para as condições de aquisição porque tem influência directa na geometria, como é o caso da profundidade de reboque da fonte e do *streamer* e no número de *folds* em cada CDP, como se viu acima.

Para aquisição dos dados utilizados neste trabalho, segundo o *log* do operador (ver Anexo 3), o intervalo entre cada disparo foi de 300 milissegundos e a velocidade do navio variou entre 2.5 e 3.5 *nós* dando uma velocidade média de 3 *nós* (5.55 Km/h). Convertendo o tempo em distância tem-se um intervalo médio entre tiro de 0.5 metros e aplicando a Equação 9 obtém-se um *fold* de 48 traços por CDP. Segundo a cobertura da sub-superfície (distância entre a metade do *offset* mínimo e metade do *offset* máximo) é sempre metade da superfície de cobertura (e.g. Parkinson, 2001). Portanto, aplicando este conceito aos dados em estudo, e tendo o *streamer* em uso um intervalo de 1 metro entre canais, para uma cobertura total (*full-fold coverage*), o intervalo entre tiros deve ser 0.5 metros. Então a velocidade adoptada está de acordo com os requisitos ideais como se verificou.

Na verificação dos dados, devido ao mau direccionamento do navio originado pelas dificuldades de manobra e pelas baixas profundidades verificadas na área em estudo, existem linhas em que se verificaram desvios acentuados nos *folds*, em que alguns CDPs atingiram valores máximos de *Trace Fold* superiores à 90 (ver Figura 44 b). Estes valores são associados as variações de velocidades.

#### **4.4.2.4. Profundidade de reboque do equipamento**

A profundidade à qual a fonte e o *streamer* devem ser rebocados depende de vários factores, os mais importantes dos quais são a salinidade e as correntes marítimas. O primeiro factor é possível controlar com o balanceamento do *streamer* e o segundo factor não se pode controlar. Outro grande factor que restringe a profundidade do equipamento é a velocidade de reboque.

Quando rebocados próximo da superfície do mar os sinais secundários reflectidos pela superfície do mar podem causar interferência destrutiva com *notches* indesejáveis a ocorrerem em frequências dependentes da profundidade de reboque. Este efeito é conhecido como *ghosting* e se o *notch* ocorrer dentro da largura de banda desejada, a largura de banda que se pode aproveitar será reduzida e a resolução degradada. A fonte sísmica (*sparker*) e o *streamer* devem ser rebocados a profundidades semelhantes e com valor equivalente a 1/4 do comprimento de onda da frequência desejada (Parkinson, 2001) (ver secção 4.4.2.1).

Na fonte utilizada, o Geo-Source 200 LW, o pulso de energia primário gerado consiste em dois picos de energia positivos, separados por um pico negativo. Segundo a convenção SEG Y, o pulso de energia positivo aponta para baixo. A assinatura resultante (ver Figura 41) emitida pelo *sparker* é a soma do pulso acústico primário e do *ghost*.



Para obter uma interferência construtiva entre a reflexão primária do sinal e do *ghost*, o tempo de atraso entre o pulso primário e o *ghost* deve ser igual ao comprimento do pulso do primeiro pico de explosão (Figura 45). De uma forma geral, a fonte e o *streamer* devem estar sempre à mesma profundidade.

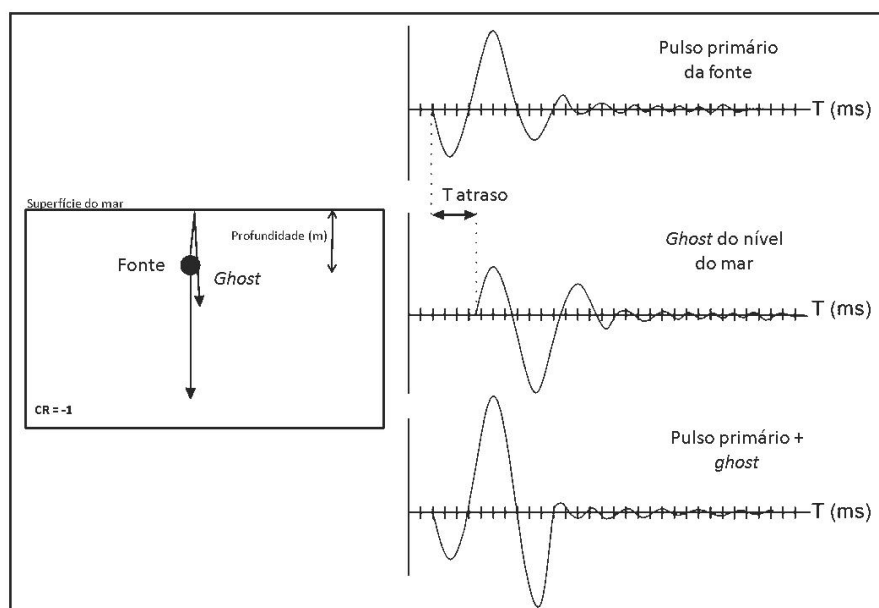


Figura 45 - Atraso do *ghost* em relação ao pulso primário, onde o coeficiente de reflexão da superfície do mar é -1 dando origem a um sinal invertido e mudança de fase de 180 graus.

Neste sistema de aquisição o atraso de tempo necessário é alcançado controlando a profundidade da fonte e do *streamer* que deve estar compreendida entre 0.20 e 0.30 metros abaixo do nível do mar, dependendo da assinatura e da energia utilizada.

Mais uma vez podem-se apontar erros à geometria no primeiro dia de aquisição (geometria 1) uma vez que a profundidade de reboque do *streamer* não era a ideal, prontamente corrigida no dia seguinte depois de verificado o mau estado dos dados.

#### 4.4.2.5. Avaliação do equilíbrio da fonte e do *streamer*

Os movimentos verticais da fonte e do *streamer* foram estimados com métodos de correcções estáticas de residuais desenvolvidos pela *GeoSurveys*, envolvendo uma revisão compreensiva dos *picks* automáticos de todos os tiros em registos de tiro (*shot gathers*) com as correcções de NMO aplicadas para a correcção das estáticas do *streamer* e *picking* do fundo do mar em CMP *gather* para a correcção das estáticas da fonte. O método de correcções estáticas do receptor também corrige qualquer problema de sincronização que possa existir entre os 48 canais, incluindo o problema de sincronização verificado entre os canais 24 e 25 em todas as linhas no âmbito deste trabalho.

A profundidade da fonte é variável na maior parte das linhas ao contrário da linha 038\_XLine4 (Figura 46), em que se mantém relativamente constante como se pode ver no gráfico do *SOU\_STAT* por cima da secção sísmica em CMP *gather*.

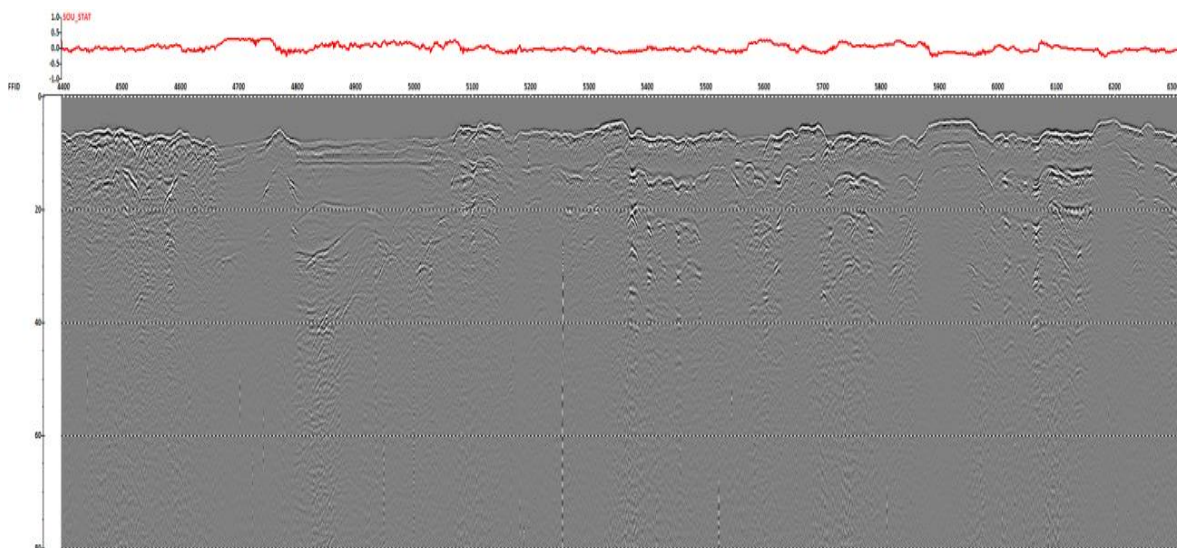


Figura 46 - - Secção sísmica em CMP *gather* com um gráfico das estáticas da fonte (SOU\_STAT), onde se pode verificar o comportamento da fonte durante a aquisição da linha. Escala vertical em milissegundos (TWT).

A profundidade do *streamer* muda significativamente mesmo dentro da mesma linha (Figura 47). Estas mudanças podem estar associadas às mudanças de velocidade de reboque através da água, dando origem a correntes superficiais, e que originam movimentos verticais do *streamer*. Dificuldades na manobra do navio e a má distribuição dos pesos ao longo do *streamer* são outras das causas para estes movimentos.

Analisando o histograma na Figura 47, que nos dá os valores das estáticas do receptor em função da sua frequência, verifica-se que o *streamer* esteve a afundar com grande frequência nesta linha. E relacionado a escala de cores do histograma com o gráfico dos FFIDs em função dos canais (Figura 48), observa-se que os primeiros 12 canais são os canais mais propensos a afundar, entretanto, esta tendência tende a estabilizar a medida em que os FFIDs vão aumentando (Figura 48).

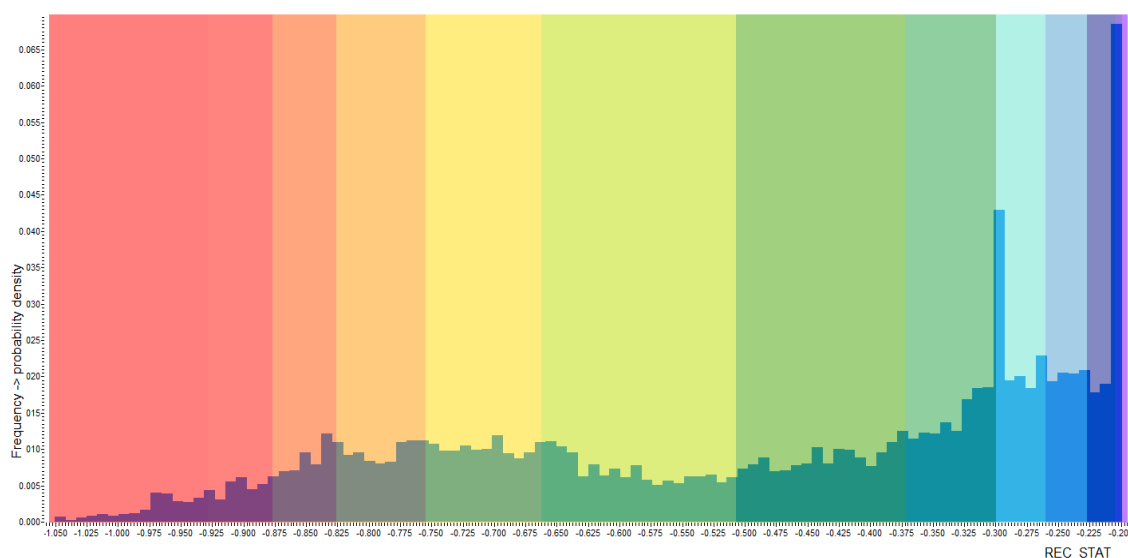


Figura 47 - Histograma das estáticas dos receptores em função da frequência que cada valor ocorre. Na escala de cores, as cores que tendem para a cor violeta corresponde os valores das estáticas em que o *streamer* esteve a afundar e cores próximo do vermelho, indicam ascensão do *streamer* à superfície



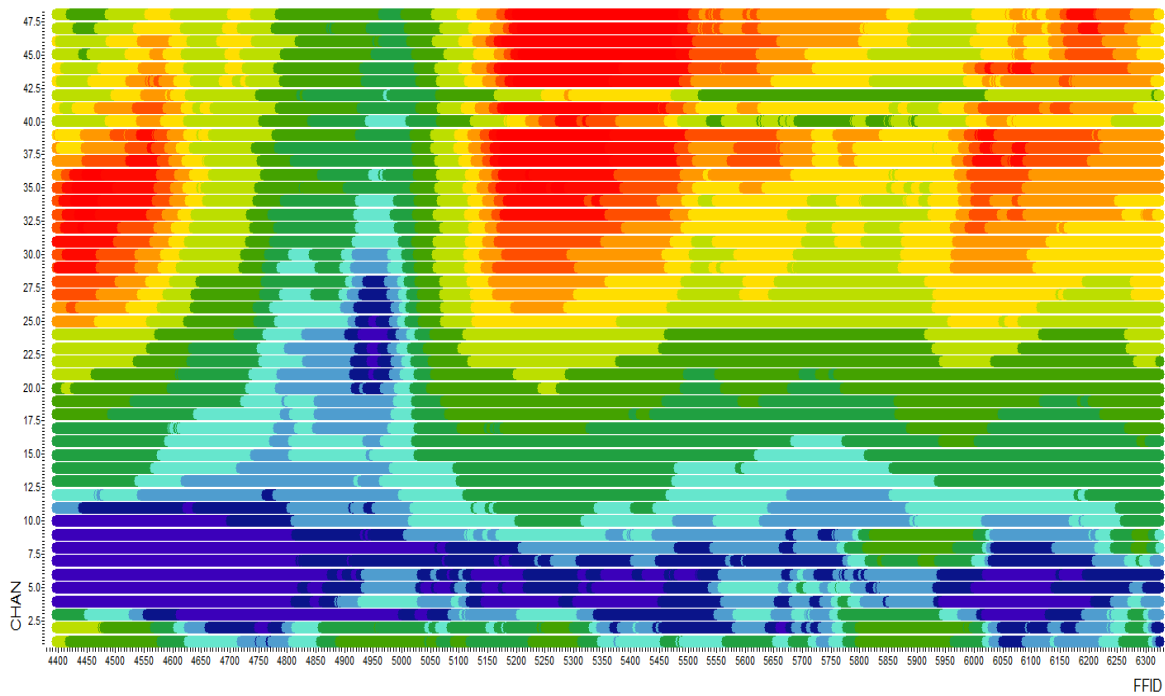


Figura 48 - Gráfico dos FFIDs em função do número de canais. Na escala de cores, a violeta representa os canais propensos a afundar e a vermelho canais que se movimentam para a superfície.

#### 4.4.2.6. Offsets fonte-receptor

De forma a determinar as geometrias fonte-receptor fiáveis para cada linha, foram medidos os tempos de chegada da onda directa com os dados sísmicos visualizados por traços (*trace gather*) nos canais 1, 2, 3, 6, 12, 24 e 48, e convertidos em metros utilizando a velocidade do som próximo superfície do nível médio do mar de 1530 m/s (Equação 15).

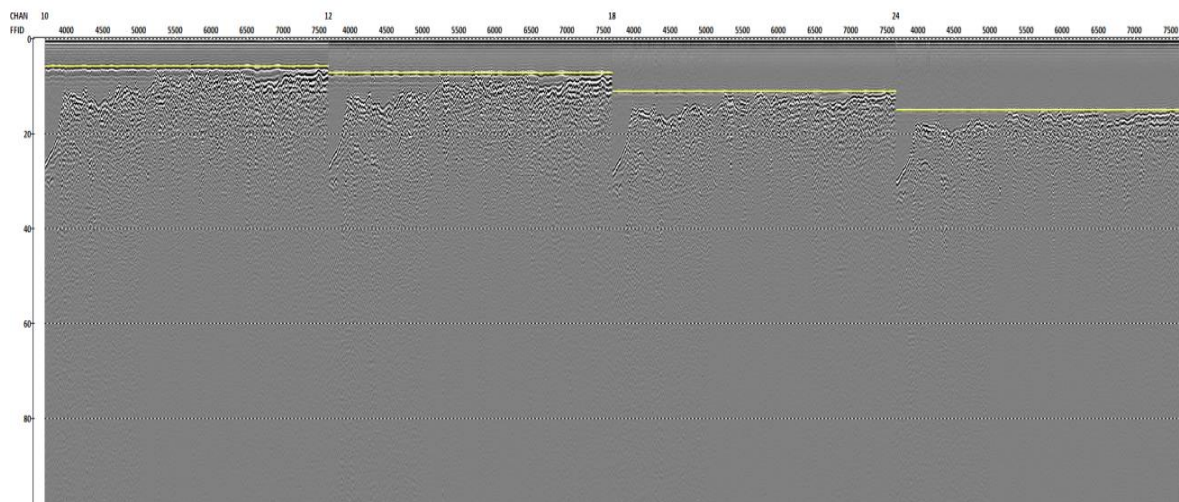


Figura 49 - *Trace gather* onde é feito o controlo dos *offsets* determinados através da medição do tempo de chegada da onda directa nos canais 10, 12, 18 e 24, V-velocidade de propagação das ondas acústicas na água e t-tempo de chegada da onda directa ao receptor

$$\text{Offset (m)} = V \times t$$

Equação 15

Em média, o traço mais próximo estava localizado 4.8 metros atrás da fonte e 1.5 metros ao lado, na geometria utilizada no dia 11 de Dezembro (geometria 1) e nos dias 12 e 13 de Dezembro (geometria 2) o traço sísmico estava localizado em média a 0.4 metros atrás da fonte e 1.8 metros ao lado (estibordo) (ver Anexo 2).

Como se pode verificar, existiu variação de *offsets* durante a aquisição devido às diferentes geometrias adoptadas (ver Figura 36) e também devido às correntes superficiais e/ou ao “pobre” direccionamento do navio (frequente).

#### 4.4.2.7. Profundidade da área de aquisição

Em ambientes de águas pouco profundas por vezes da geometria de aquisição resulta uma distância entre a fonte e o *streamer* significativamente larga nalgumas zonas em relação ao fundo do mar. Nestas condições, além da dificuldade na mobilidade do navio, torna-se difícil atenuar os múltiplos originados pela superfície do nível do mar (reverberações), principalmente quando o fundo do mar é constituído por sedimentos duros e altamente compactados. Estas superfícies podem dar origem a múltiplos com amplitudes superiores às reflexões primárias, e não são atenuados totalmente pela desconvolução e ainda afectam eventos que ocorrem à superfície, que têm um período próximo do período correspondente à camada de água.

### 4.5. Processamento de dados de sísmica multicanal de muito alta resolução – UHRS

Foram processados 18 perfis de sísmica (UHRS) multicanal utilizando o *software RadexPro* da *Deco Geophysical*, perfazendo um comprimento total de 13.5 Km e cobrindo uma área total de aproximadamente 3.3 Km<sup>2</sup>. O processamento teve como foco aperfeiçoar a resolução da secção sísmica e acima de tudo a qualidade do sinal nos primeiros 30 metros abaixo do fundo do mar.

Apesar de haver duas geometrias de aquisição, à parte do passo da definição da geometria para cada um dos casos, utilizou-se um fluxo único de processamento e apenas uma assinatura para a desconvolução, uma vez que foi utilizada apenas uma fonte de energia.

#### 4.5.1. Sequência de processamento utilizada

Inicialmente converteram-se os dados sísmicos do formato *Geomarine proprietary format* (GRDF) para o formato padrão utilizado na maior parte das empresas dedicadas a geofísica, o formato SEG-Y, utilizando o conversor de dados o *GeoRecorder*. De seguida os dados sísmicos foram processados utilizando o fluxo de processamento esquematizado na Figura 50 e aplicados os processos e parâmetros constantes da Tabela 3.

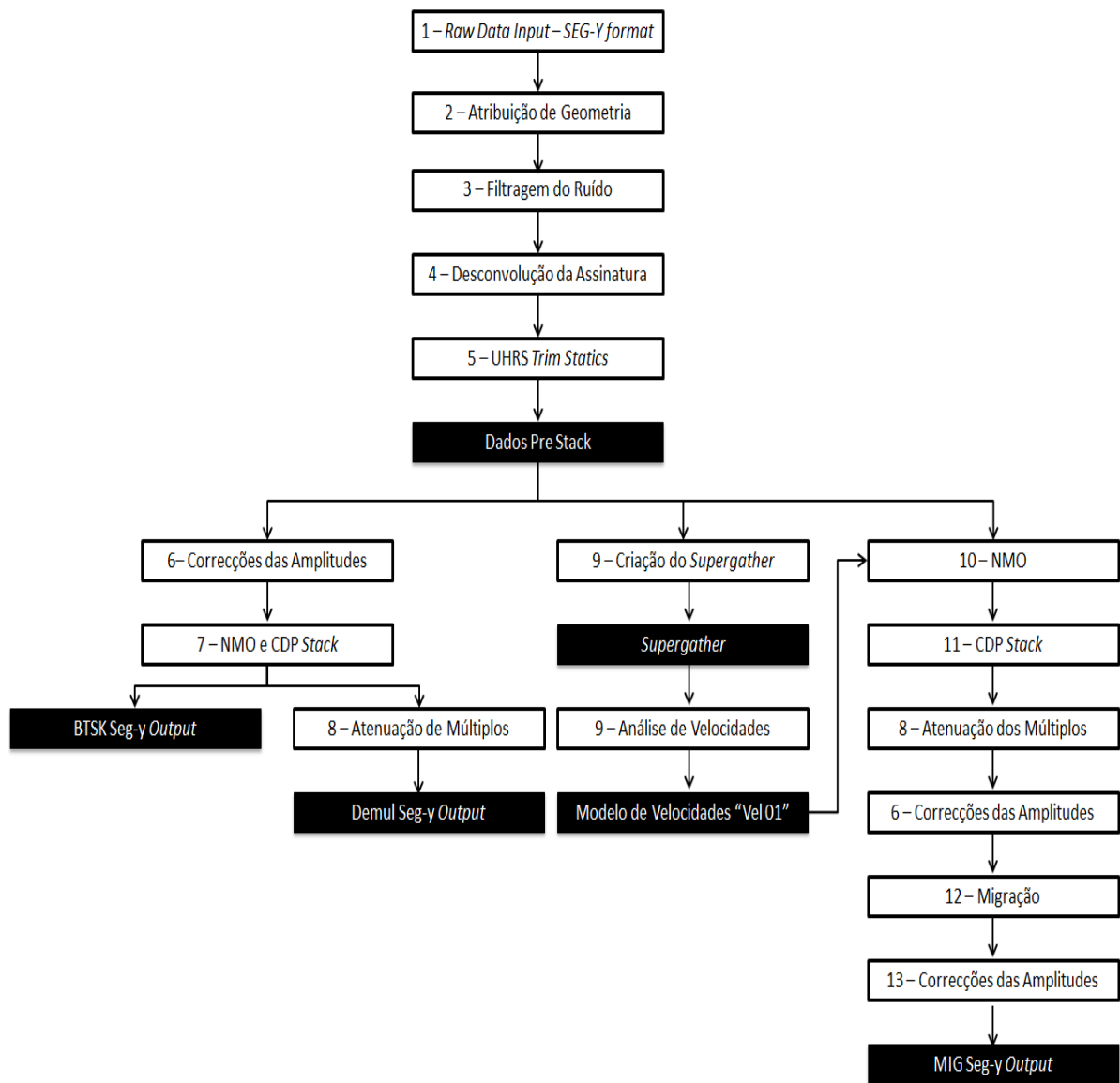


Figura 50 - Fluxo de processamento as linhas sísmicas. As caixas de texto sem qualquer preenchimento representam passos de processamento e as caixas preenchidas a preto representam produtos de *output*.

<b>1</b>	<b>SEG-Y Data Input</b>	
<b>2</b>	<b>Atribuição da Geometria</b>	
	CDP Bin Size:	0.5
	Nominal CDP fold:	48
<b>3</b>	<b>Filtragem do Ruído</b>	<i>Ormsby Bandpass Frequency Filter</i>
	Lc-Lp-Hp-Hc	200-350-3500-5000 Hz
<b>4</b>	<b>Desconvolução da Assinatura</b>	<i>Custom Impulse Transforms</i>
	Impulse dataset:	Assinatura da fonte
	Amplitude spectra:	Divisão
	Phase spectra:	Subtração
<b>5</b>	<b>UHRS Trim Statics</b>	Cálculo e aplicação das estáticas
		Estáticas do Receptor
		Estáticas da Fonte
<b>6</b>	<b>Correcções das Amplitudes</b>	
		Correcções da divergência esférica
<b>7</b>	<b>Correcções do Normal Moveout</b>	
	Velocidades RMS:	Função Única de Velocidade: 1530 m/s
	Mute Stretch Threshold	100 %
	<b>CDP Stack</b>	
	Alpha-trimmed Mean:	35 %
<b>8</b>	<b>Atenuação de Múltiplos</b>	<i>Zero-Offset Demultiple</i>
	Mode:	Static shift
	Subtraction filter length:	35
	White noise level:	0.1
	Band transform frequency	150-3500 Hz
<b>9</b>	<b>Análise de Velocidades</b>	<i>Interactive Velocity Analysis</i>
	Supergather size:	3 CDPs
	Interval of Analysis:	50-100 CDPs (25-50 metros)
	Output Model	Vel 01
<b>10</b>	<b>Correcções do Normal Moveout</b>	
	Modelo de Velocidades	Vel 01
	Mute Stretch Threshold	50 %
<b>11</b>	<b>CDP Stack</b>	<i>CDP ensemble stack</i>
	Alpha-trimmed Mean:	35 %
<b>12</b>	<b>Migração</b>	<i>F-K Stolt Migration</i>
	Velocidade de Migração:	1550 m/s
	Frequência máxima migrada:	3500 Hz
	Intervalo de declínio da frequência:	500 Hz
<b>13</b>	<b>Correcções das Amplitudes</b>	
	Correcção exponencial:	70 dB

Tabela 3 - Parâmetros de processamento de dados de sísmica multicanal UHRS no *software RadexPro*.

## 4.5.2. Descrição dos fluxos de processamento mais relevantes

### 4.5.2.1. Atribuição da geometria

Depois de adquiridos e convertidos em SEG-Y, os dados sísmicos estão dispostos em registos de tiro (FFID – *Field File Identification*); para os processar têm de estar em CDP.

Para dispor os dados sísmicos em CDPs atribuiu-se a geometria do plano de aquisição, que inclui a localização das fontes e dos receptores, a distância entre receptores, o número total de canais. A tabela da geometria foi preenchida utilizando a posição da antena GPS (ver Figura 36) a partir dos ficheiros de navegação e os *offsets* (fonte-primeiro canal) foram calculados a partir do tempo de chegada da onda directa e da velocidade das ondas acústicas na água, próximo da superfície. O ponto médio foi calculado para cada traço e o CDP *Bin* atribuído foi de 0.5 metros.

- Geometria da fonte

Dx: 1.5 metros;

Dy: 27 metros (geometria 1 e geometria 2)

- Geometria do *streamer*

Dx primeiro receptor: 3.5 metros;

Dy primeiro receptor: 32.5 metros (geometria 1)/ 27 metros (geometria 2);

Número de receptores: 48;

Distância entre receptores: 1 metro.

Os valores apresentados são valores médios, porque ao aplicar os valores de *offset* calculados estes valores variam de linha para linha.

As linhas processadas apresentavam em média o CDP *fold* desejado de 48 (Figura 51); contudo, em linhas com fraco direcionamento o CDP máximo alcançado pode atingir valores superiores a 90, como é o caso a linha 039\_XLine4bis.

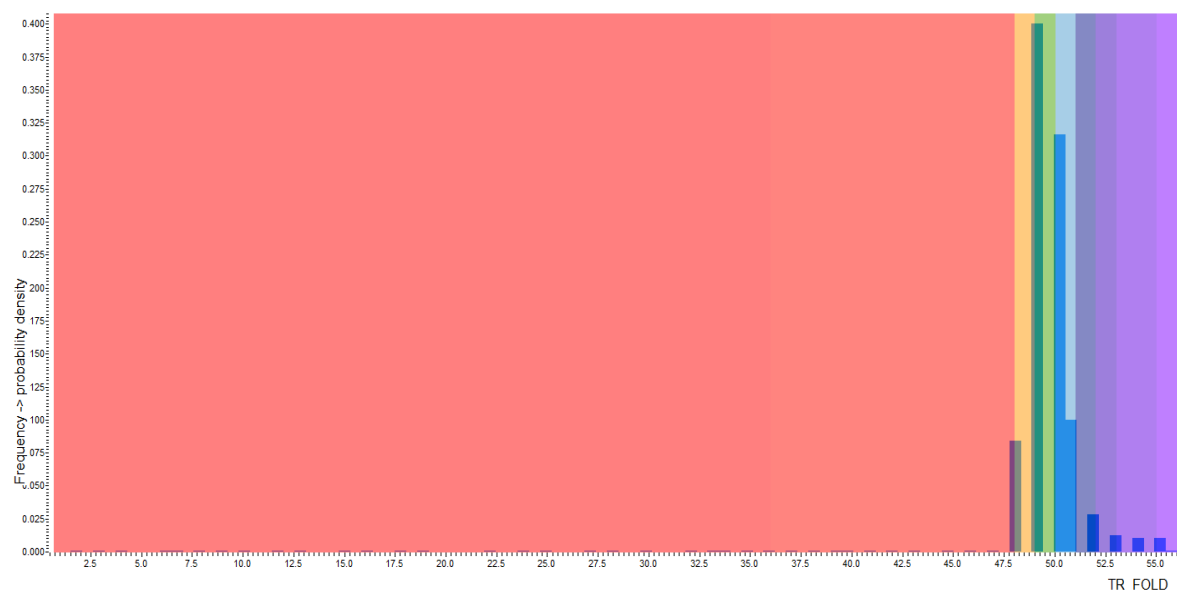


Figura 51 - Histograma de TR\_FOLD em função da frequência do número de *folds* para a linha 037\_XLine1.

#### 4.5.2.2. Filtragem do ruído

Para supressão de ruído de baixa e muito alta frequência, foi utilizado o filtro *Ormsby Bandpass* nas bandas exteriores das frequências de interesse. Pela notação utilizada no *software* de processamento utilizaram-se os seguintes parâmetros:

Low Cut Frequency: 200 Hz

Low Pass Frequency: 350 Hz

High Pass Frequency: 3500 Hz

High Cut Frequency: 5000 Hz

A Figura 52 representa um exemplo do *Raw data* antes da filtragem e a Figura 53 representam os dados depois da filtragem.

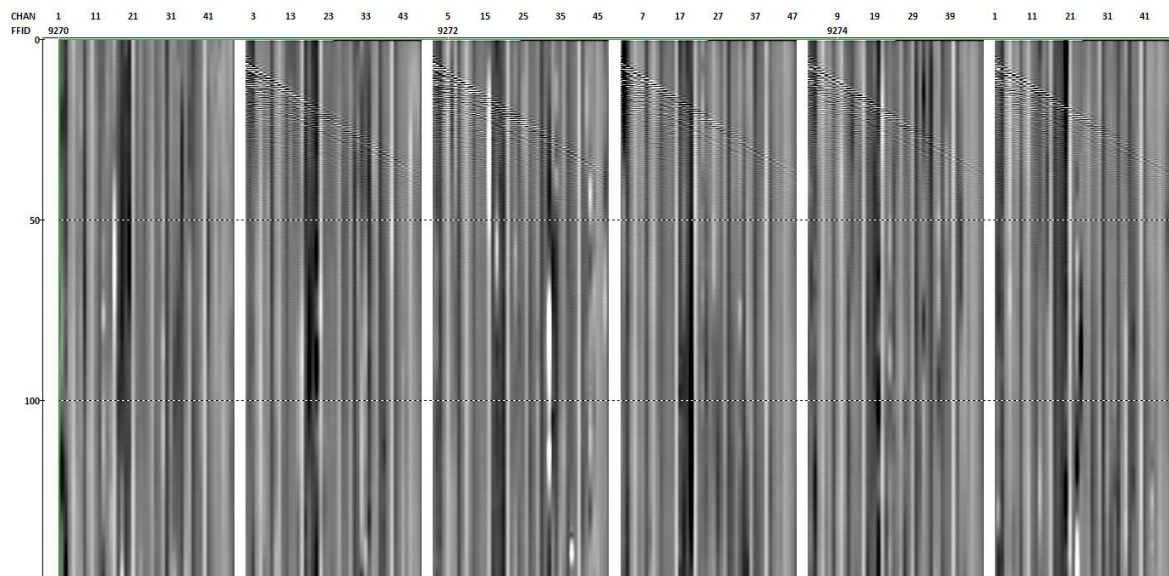


Figura 52 – Registo de tiro do *raw data* antes da filtragem. Escala vertical em milissegundos (TWT).

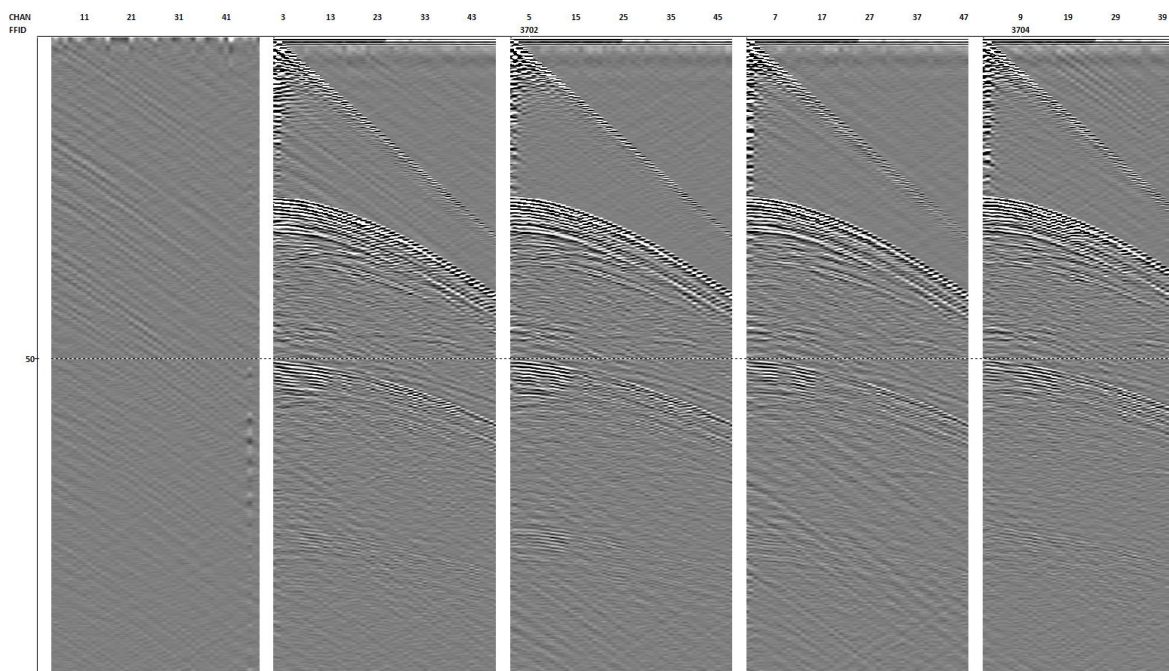




Figura 53 – Registo de tiro do *Raw data* depois da filtragem. Escala vertical em milissegundos (TWT).

#### 4.5.2.3. Desconvolução da assinatura Pré-Stack

A desconvolução da assinatura foi utilizada para colapsar o pulso primário da fonte e *ghosts* da fonte e do receptor, assim como múltiplos resultantes das reflexões da superfície da camada de água. Utilizaram-se reflexões médias do fundo do mar resultantes da selecção de traços com boa resposta do fundo do mar para modelar a assinatura fonte registada.

A desconvolução foi feita utilizando o módulo “*Custom Impulse Trace Transform*”, que envolve a combinação de uma divisão dos espectros de amplitude dos dados e da fonte sísmica, e a subtração do espectro da fase dos traços e da assinatura sísmica. Na divisão do espectro de amplitudes, os espectros de amplitude de todos os traços são divididos pelo espectro de amplitudes da assinatura da fonte sísmica. Por ser uma operação instável é necessário definir um factor de atenuação, o *White noise level*, valor adicionado ao espectro da assinatura antes da divisão. Na subtracção, o espectro da fase da assinatura da fonte é subtraído do espectro da fase de todos os traços.

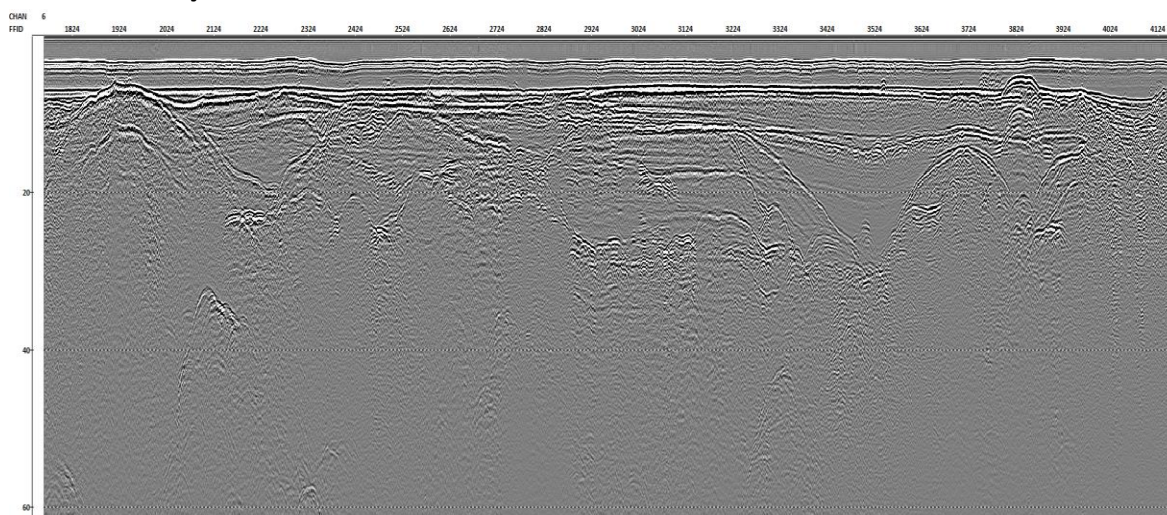


Figura 54 – Canal 6 da linha 037\_Xline1, antes da desconvolução da assinatura da fonte. Escala vertical em milissegundos (TWT).

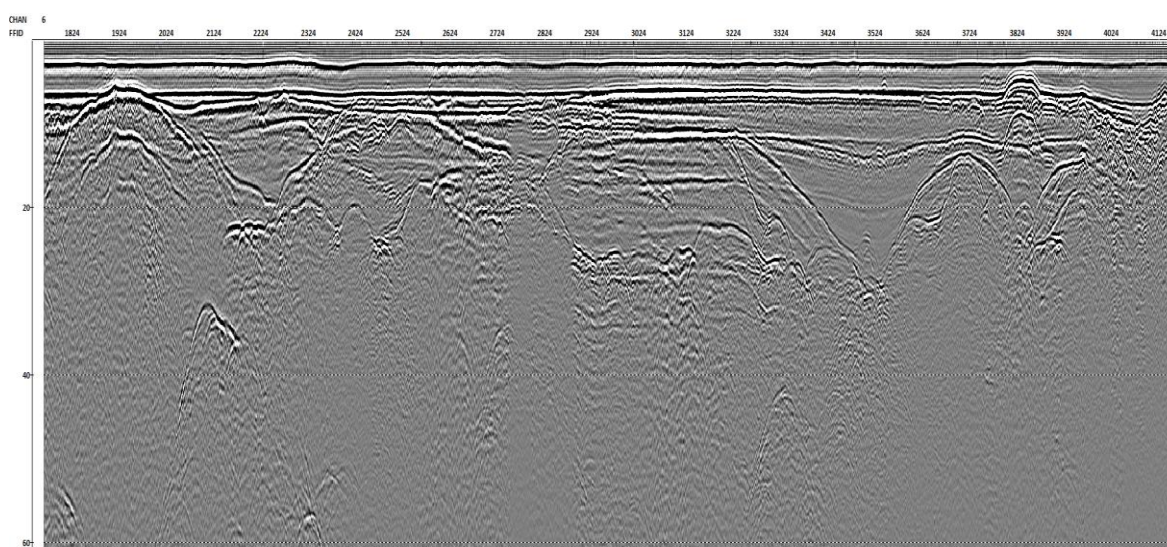




Figura 55 - Canal 6 da linha 037\_Xline1 depois da desconvolução da assinatura da fonte. Escala vertical em milissegundos (TWT).

#### 4.5.2.4. UHRS *trim statics*

As estáticas da fonte e do *streamer*, *trim statics*, incluíram o procedimento de correcção das estáticas residuais aplicada traço a traço para compensar o movimento vertical do equipamento rebocado. Este procedimento desenvolvido pela *GeoSurveys*, incluiu uma revisão cuidada dos *picks* automáticos de todos os registos de tiro para a correcção das estáticas do *streamer* e o *picks* da superfície do fundo do mar no *CMP gather* para a correcção das estáticas da fonte. Este procedimento eleva para o dobro a qualidade do sinal obtida em procedimentos como os do controlo da geometria e da qualidade do sinal de todos os *datasets* (Figura 57).

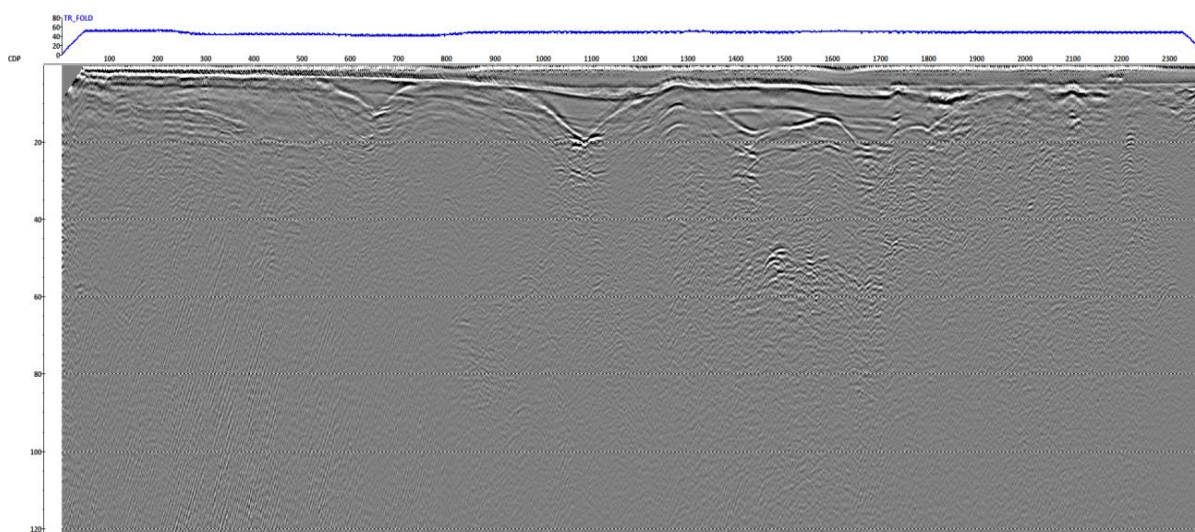


Figura 56 – Linha 032\_Line7 antes de serem aplicadas as correcções estáticas. Escala vertical em milissegundos (TWT).

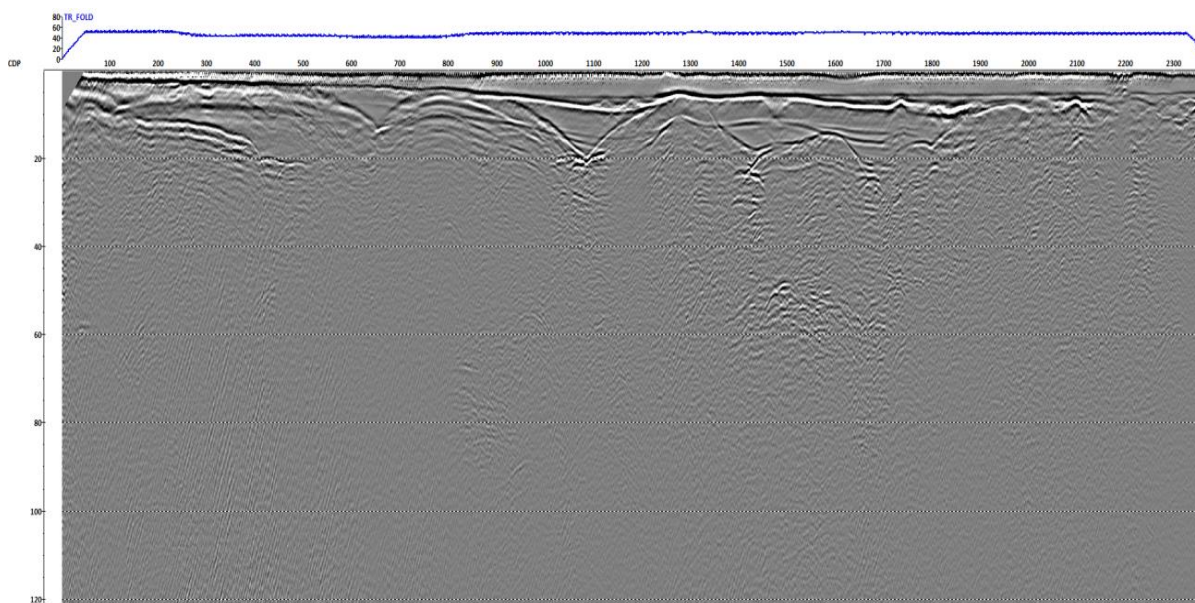


Figura 57 - Linha 032\_Line7depois de serem aplicadas as correcções estáticas. Escala vertical em milissegundos (TWT).



#### 4.5.2.5. Atenuação de múltiplos – *Zero-Offset DeMultiple*

O processo de atenuação dos múltiplos foi feito utilizando o módulo *Zero-Offset DeMultiple* do software *RadexPro*. Este processo é baseado na subtração adaptativa do modelo de múltiplos obtidos a partir das reflexões primárias, e pode ser feito por desvios das estáticas, ou por autoconvolução. A atenuação do múltiplo foi feita utilizando um comprimento de filtro de 35 amostras, um *white noise level* de 0.1% e uma frequência de transformação de banda entre 150 e 3500 Hz (Tabela 3).

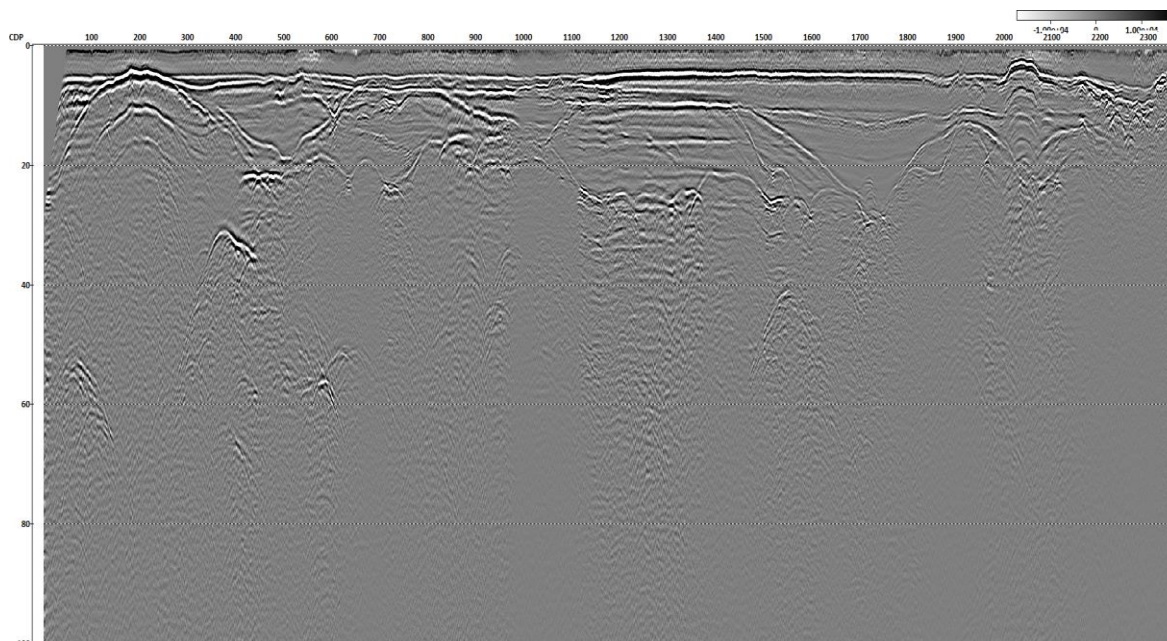


Figura 58 – Linha 037\_Xline1 antes da atenuação do múltiplo. Escala vertical em milissegundos (TWT).

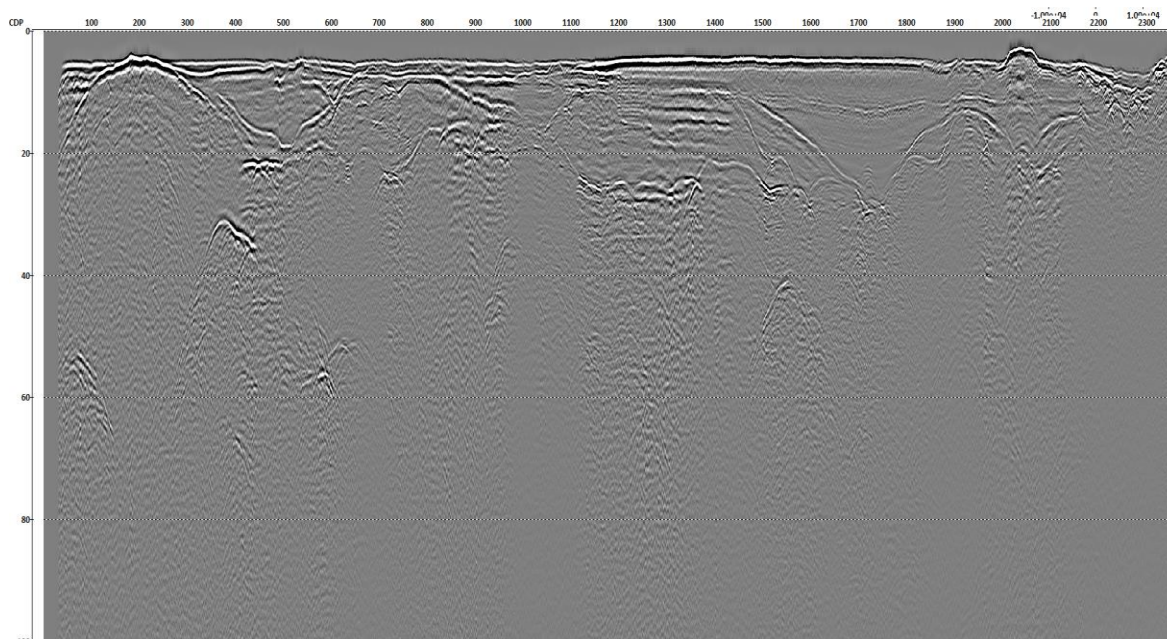


Figura 59 - Linha 037\_Xline1 depois da atenuação do múltiplo. Escala vertical em milissegundos (TWT).

#### 4.5.2.6. Análise de velocidades – *Interactive Velocity Analysis (IVA)*

Para a análise de velocidades foi gerado um *supergather* constituído por 3 CDPs, de 50 em 50 CDPs para linhas mais pequenas e de 100 em 100 CDPs para linhas maiores. Gerou-se ainda um modelo de velocidades RMS através da análise interactiva de velocidades (IVA), com resolução horizontal de 50 metros (Figura 60). O modelo de velocidades obtido foi utilizado para fins de correcção do NMO.

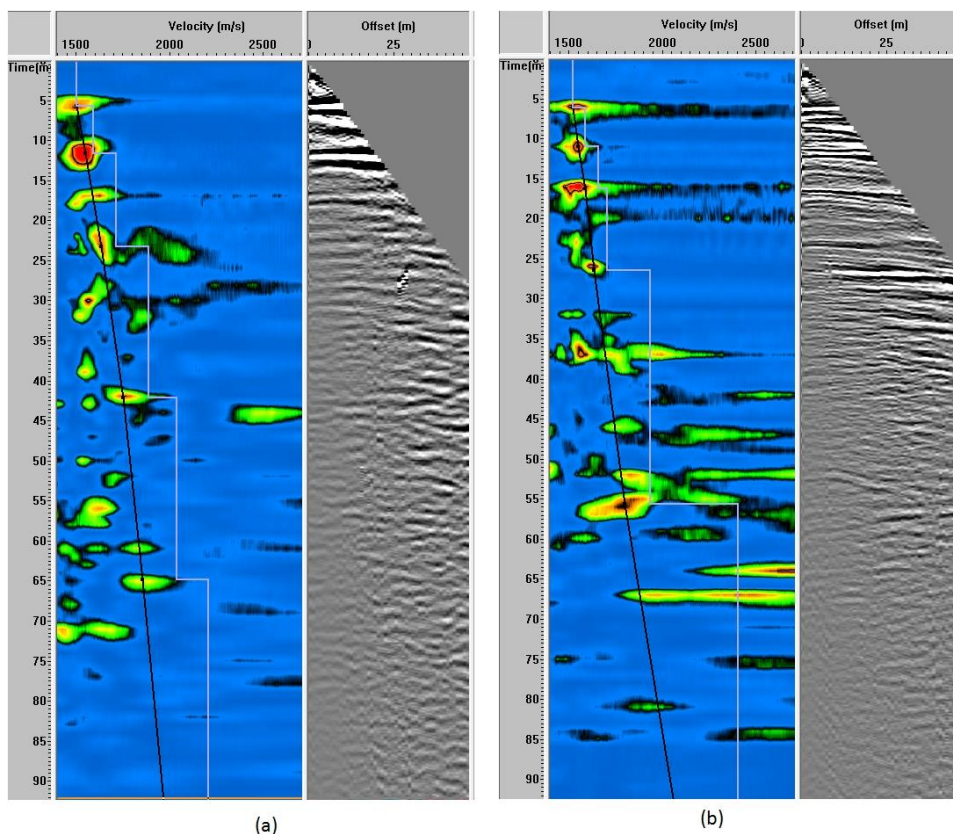


Figura 60 - Análise interactiva de velocidades (a) CDP 200 e (b) CDP 700 para a linha 037\_XLine1. As linhas cinzentas mostram as velocidades de intervalo. A figura ilustra uma penetração efectiva do sinal superior a 60 milissegundos. Escala vertical em milissegundos (TWT).

#### 4.5.2.7. Correções de NMO e CDP *stack*

A velocidade obtida na análise interactiva de velocidades foi utilizada para aplicar as correcções de *Normal Moveout* aos CDP *gathers*, utilizando um *stretch mute threshold* de 50%. Em seguida, os traços dos CDP *gathers* foram somados aplicando um *alfa trimmed mean* com rejeição de 35 % dos *outliers* (Ver Tabela 3).

#### 4.5.2.8. Correções das amplitudes

O módulo “*true amplitude recovery*” utilizado aplica um ganho variante no tempo aos traços, para compensar as perdas de amplitude devido à propagação e à atenuação da frente de onda. Ambas as correcções de divergência esférica e exponencial (70 dB/ms) foram aplicadas aos



dados, para compensar, respectivamente, a perda de amplitudes devido ao espalhamento esférico da frente de onda e à atenuação durante a propagação em formações geológicas. Estas correcções visam manter as proporções entre o coeficiente de reflexão e a amplitude a qualquer profundidade.

A correcção de divergência esférica vai atenuar a diminuição das amplitudes e manter a sua intensidade relativa elevando o tempo e a velocidade de propagação das ondas acústicas ao quadrado e multiplicando-os entre si, dando origem ao ganho.

#### 4.5.2.9. Migração – *Post-Stack Stolt F-K Migration*

Para aumentar a resolução lateral, foi utilizada a migração pós-stack *Stolt F-K migration*, utilizando 3500 Hz como frequência máxima de migração e 500 Hz o intervalo máximo de declínio da frequência.

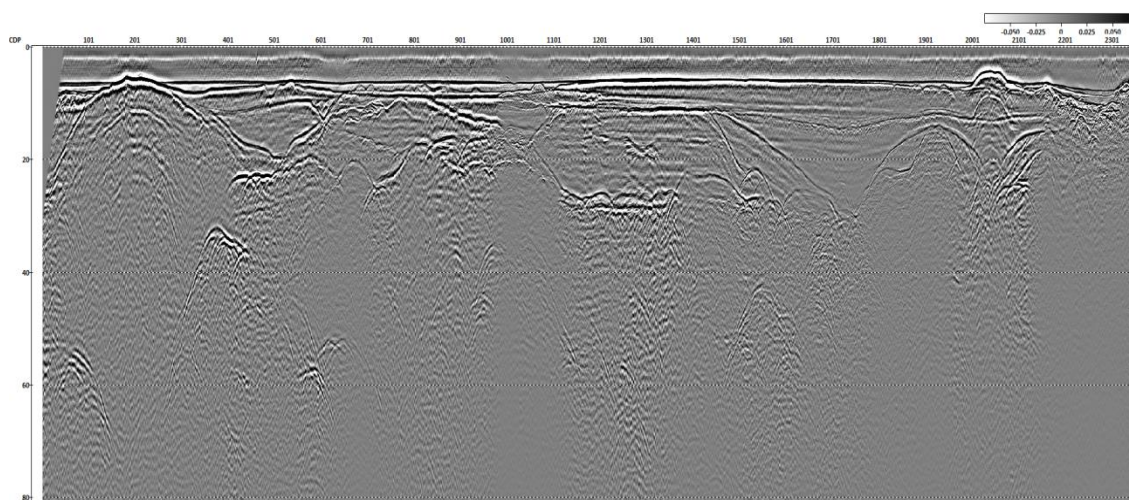


Figura 61 – Linha 037\_Xline7 antes da migração. Escala vertical em milissegundos (TWT).

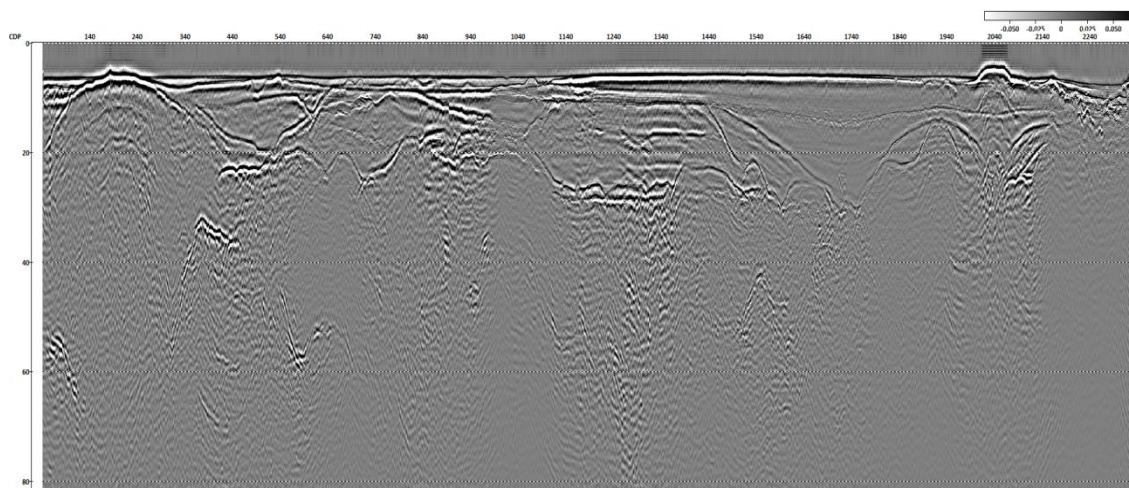


Figura 62 - Linha 037\_Xline7 depois da migração. Escala vertical em milissegundos (TWT).

Este módulo é utilizado para migração de dados sísmicos em que não haja variações significativas da velocidade de propagação das ondas através do solo, de preferência com velocidades constantes. Nesta migração considera-se o *offset* (distância entre a fonte e o

receptor) como sendo zero, e assume-se que os traços são equidistantes com o intervalo entre traços vizinhos, atribuído pelo parâmetro  $dx$ , em metros. Foi utilizada uma velocidade de migração de 1550 m/s.

## 5. Introdução à interpretação sísmo-estratigráfica

Para se fazer a interpretação dos dados sísmicos, é necessário fazer uma identificação e análise das sequências e fácies sísmicas, que são interpretadas com base nas terminações e configurações dos refletores sísmicos nas várias sequências sísmo-estratigráficas. O processo de interpretação sísmo-estratigráfica completo consiste em reconhecer, correlacionar e determinar a idade das sequências sísmicas, reconhecer, cartografar e interpretar as fácies sísmicas e fazer uma análise regional da variação do nível da água do mar durante a sua deposição (Mitchum *et al.*, 1977). As terminações e as configurações dos refletores sísmicos são interpretadas como padrões de estratificação ou de não-deposição, e são usadas para reconhecer e correlacionar sequências deposicionais, interpretar os ambientes deposicionais e estimar as litofácies (Mitchum *et al.*, 1977).

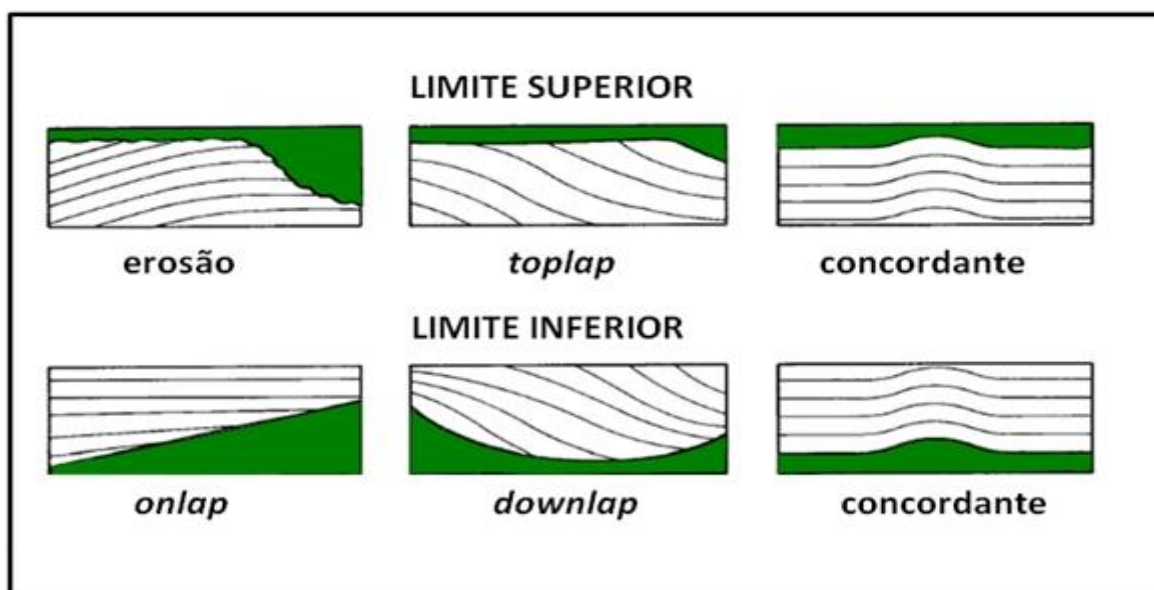


Figura 63 - Diferentes tipos de terminações de reflexões que definem os limites das sequências sísmo-estratigráficas (modificado de Mitchum *et al.*, 1977).

Uma sequência sísmica é uma unidade estratigráfica composta por uma sucessão de camadas geneticamente relacionadas, que apresentam características semelhantes entre si, separadas no topo e na base por discordâncias marcadas pelas terminações das reflexões, ou pelas conformidades correlativas (Mitchum *et al.*, 1977).

As terminações das reflexões são o principal critério para o reconhecimento dos limites das unidades sísmo-estratigráficas em estratigrafia sequencial. Na parte superior (Topo da sequência), as terminações das reflexões podem indicar limites do tipo erosão, *toplap* ou concordância (não há terminações) e na parte inferior (Base) tem-se os *baselap* (*onlap* e *downlap*) ou concordância (Figura 63).

Depois de definidas as unidades sísmo-estratigráficas, interpreta-se o ambiente e litofácies existentes no interior das unidades a partir da sísmica ou de informações geológicas que possam existir (dados de poços, por exemplo). Esta fase inclui a descrição e interpretação geológica dos dados da sísmica de reflexão, nomeadamente a configuração, continuidade, amplitude, frequência e intervalos de velocidade dos vários reflectores e unidades (Figura 64) (Mitchum *et al.*, 1977).

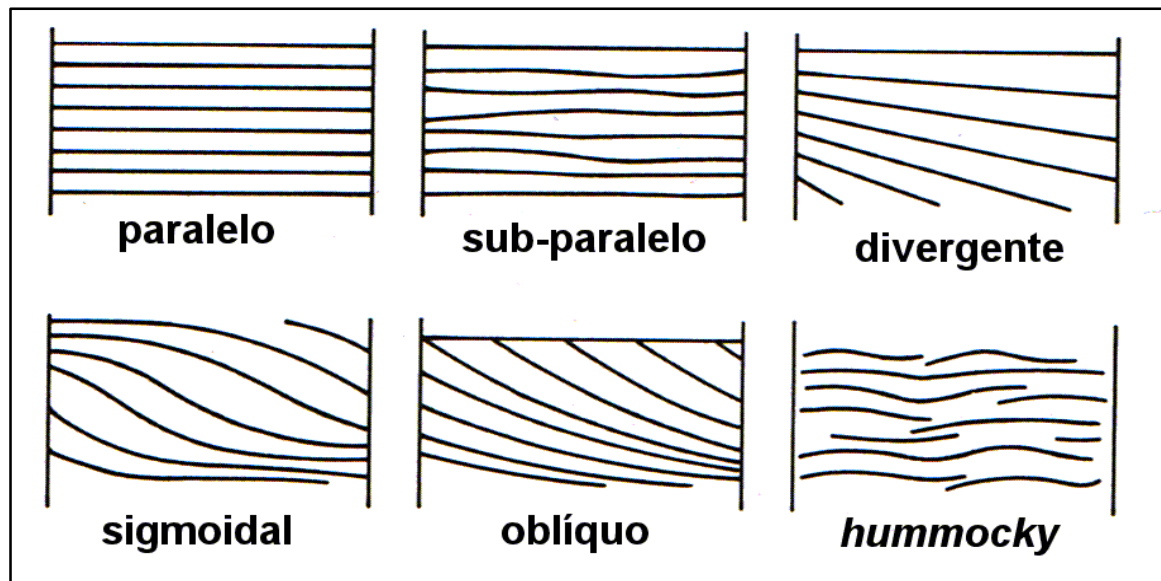


Figura 64 - Algumas das configurações internas das reflexões para diferentes fácies sísmicas em sequências sedimentares que podem ser identificadas em secções sísmicas (modificado de Mitchum *et al.*, 1977).

As zonas onde os refletores são mais fortes normalmente representam zonas de interface entre camadas com elevado contraste de impedância acústica ou a presença de hidrocarbonetos.

### 5.1. Interpretação sísmo-estratigráfica das secções sísmicas em estudo

Para se identificarem as principais unidades sísmo-estratigráficas interpretaram-se os dados sísmicos, identificando as principais discontinuidades estratigráficas e/ou zonas de interface entre camadas. Trata-se de superfícies normalmente localizadas em zonas onde as terminações de reflexões são mais marcadas e delimitam diferentes fácies sísmicas em sequências sedimentares que podem ser identificadas nas secções sísmicas.

Depois de observar os dados sísmicos e identificar os padrões geométricos gerados pelas terminações, configurações internas das reflexões e as fácies sísmicas, e observar a relação entre os diferentes conjuntos de estratos presentes nas secções sísmicas passíveis de interpretação, foram utilizadas 5 secções sísmicas para a interpretação (Figura 65) e identificaram-se quatro zonas de interface/horizontes principais (Figura 66 e Figura 67).

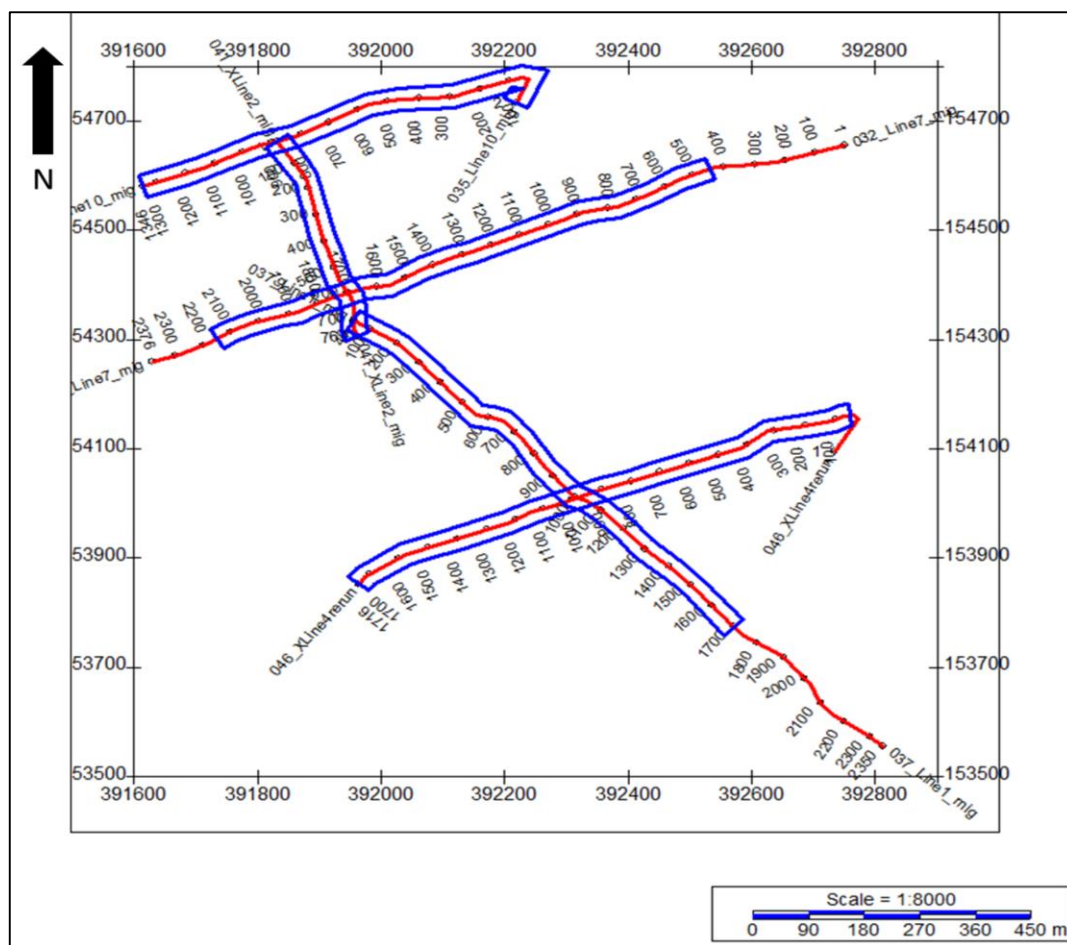


Figura 65 – Base map com as linhas sísmicas interpretadas assinaladas (ver Figura 6).



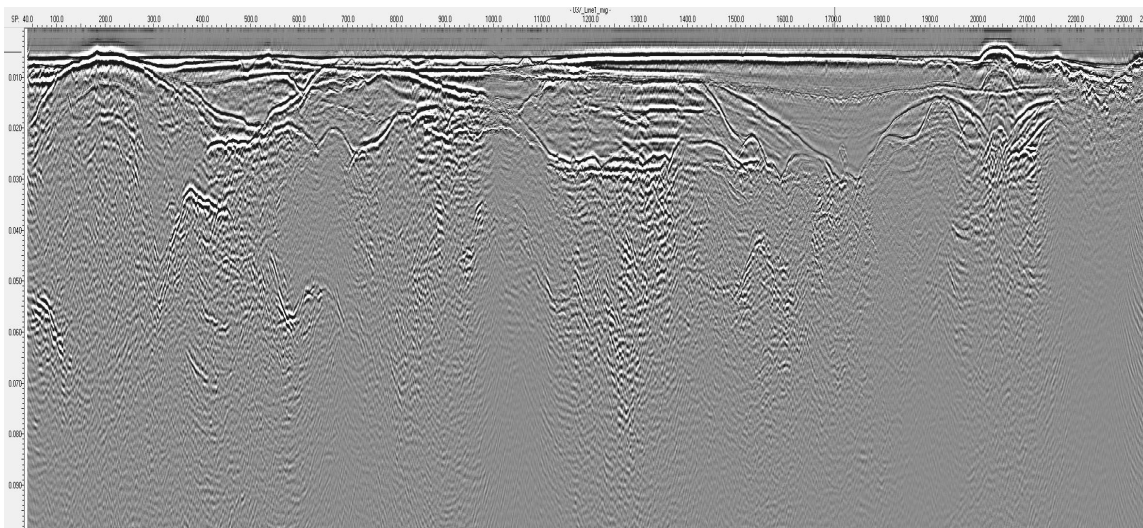


Figura 66 - Perfil sísmico da linha 037\_XLine1 sem interpretação, Escala vertical em segundos (TWT).

Utilizando o *software Kingdom Suite* interpretaram-se os seguintes horizontes principais: o primeiro horizonte que corresponde ao fundo do mar (*seabed-SB*), identificado como SB, representado a vermelho; o segundo horizonte interpretado corresponde ao horizonte H2, representado a azul-marinho e finalmente foi interpretado o horizonte H3, representado a púrpura (Figura 67).

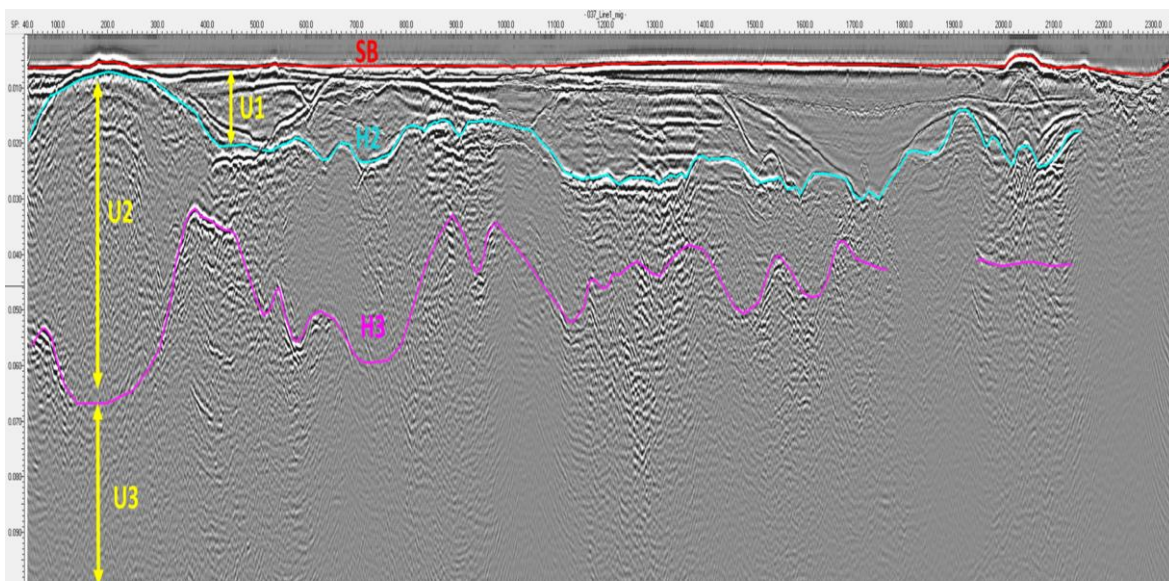
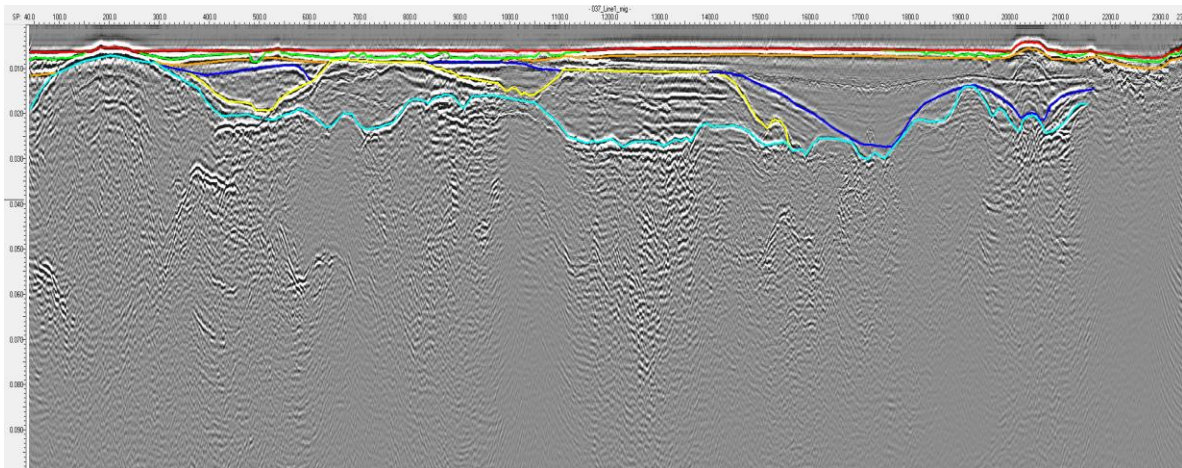


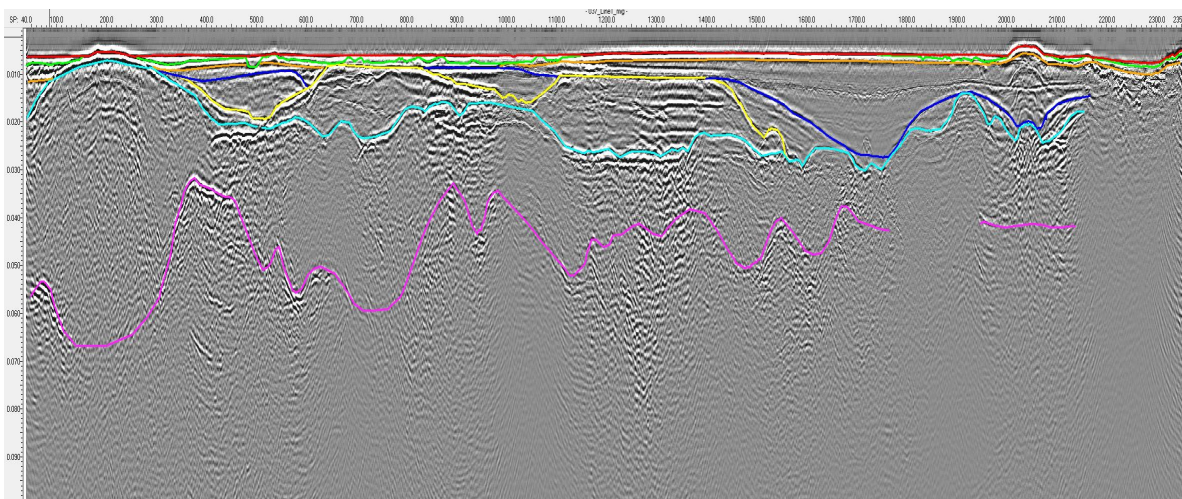
Figura 67 – Perfil sísmico da linha 037\_XLine1 para ilustrar os horizontes interpretados que correspondem às principais unidades estratigráficas. Escala vertical em segundos (TWT).

A unidade entre o *Fundo do Mar (SB)* e o horizonte H2 (Figura 69) mostra várias estruturas sedimentares/erosivas complexas e algumas delas correlacionadas entre os perfis (ver ANEXO 4). A Figura 68 mostra todos os horizontes interpretados no âmbito deste trabalho.





**Figura 68** - - Perfil sísmico 037\_XLine1 com estruturas sedimentares complexas e interpretadas entre o *Seabed* e o horizonte H2. Escala vertical em segundos (TWT).



**Figura 69** - - Perfil sísmico 037\_XLine1 com a totalidade dos horizontes interpretados. Escala vertical em segundos (TWT).

Com base nas configurações internas interpretaram-se três unidades sismo-estratigráficas principais (ver Figura 67). Assumindo uma velocidade de propagação das ondas acústicas através da água de 1530 m/s, a coluna de água apresenta em média uma espessura de aproximadamente 4 metros.

A unidade 1 é a camada situada abaixo do horizonte que representa o fundo do mar (SB) e acima do horizonte H2 (ver Figura 67), com uma configuração interna das reflexões paralela e boa continuidade lateral. Está dividida em várias sub-unidades de estruturas sedimentares e algumas delas erodidas, sugerindo a presença de canais. É uma unidade caracterizada por terminações de reflectores erodidos, e em *downlap* na base (Horizonte azul marinho), uma configuração interna dos reflectores, que varia entre paralelo nas sub-unidades superficiais (do *seabed* ao reflector laranja) a oblíqua (por vezes sigmoidal) nas sub-unidades da parte inferior da unidade. As sub-unidades da parte inferior desta unidade apresentam estruturas canalizadas na maior parte da sua extensão, provavelmente constituída por areia e argilas que podem ter origem em depósitos fluviais transportadas e depositadas pelos canais. Como já foi referido anteriormente, é uma unidade com uma estrutura interna muito complexa e difícil de cartografar devido às suas

irregularidades e várias truncaturas. É uma unidade com espessura média de aproximadamente 15 metros, assumindo uma velocidade de propagação das ondas acústicas através do solo de 1600 m/s.

A unidade 2 é a camada situada entre os horizontes H2 e H3 resultantes da interpretação, com o topo muito forte, com amplitudes e variação lateral variável entre fraca e forte. Tem uma configuração interna de reflectores do tipo *hummocky*, em que as reflexões são na sua maioria estratificadas e cruzadas. Tem uma espessura média de aproximadamente 25 metros, assumindo uma velocidade de propagação das ondas acústicas através do solo de 1700 m/s.

Por último tem-se a unidade 3 que se encontra por baixo do horizonte interpretado H3, com configuração interna semelhante a unidade 2, com configuração interna dos reflectores entre *hummocky* e caótica.

## 6. Discussão de resultados

Os dados de sísmica multicanal de muito alta resolução (*UHRs*) utilizados no âmbito deste trabalho foram largamente afectados pelas condições de operação durante a aquisição. A estas condições acresce o facto de a geometria adoptada inicialmente não corresponder aos parâmetros de aquisição mais adequados às características da zona de pesquisa.

Condições de operação como o rumo desejado e a velocidade do navio são negativamente afectados principalmente pela profundidade da zona de pesquisa, o que causa sérias limitações a manobrabilidade do navio de aquisição/pesquisa. A má aplicação dos parâmetros de aquisição delineados durante a fase de preparação da campanha de aquisição tem igualmente consequências negativas nos dados, como é exemplo a má distribuição dos pesos ao longo do *streamer* durante toda a campanha, e os *offsets* e profundidade de reboque do equipamento, como aconteceu no primeiro dia de aquisição.

Todas estas condicionantes tiveram efeitos negativos tanto na geometria de aquisição como nas secções sísmicas finais resultantes do processamento; no entanto, através da aplicação das técnicas de processamento adequadas, alguns dos “ruídos” originados por estas condicionantes foram parcial ou totalmente atenuados, como são os casos dos *Burst noise*, estáticas devidas à variação da profundidade do *streamer* e do ruído registado devido a obras na área envolvente à zona de pesquisa.

A dificuldade na manobrabilidade devido à profundidade da zona de pesquisa fez com que o direccionamento do navio fosse pobre. Esta limitação nota-se em algumas linhas em que não foi possível manter o *streamer* em linha recta. Correntes laterais podem também ter agravado esta situação nalguns casos. Veja-se o exemplo na Figura 4, em que as linhas 026\_Line2, 039\_XLine4\_bis e 040\_XLine3, são linhas em que se verifica a dificuldade no direccionamento causado por obstáculos físicos na trajetória do navio.

A velocidade do navio durante a aquisição esteve directamente relacionada com a dificuldade de manobra do navio fazendo com que esta não fosse constante, uma vez que o registo de tiro se estava a fazer em intervalo de tempo. Com o registo de tiro a ser feito em tempo é ideal ter uma velocidade constante. Os efeitos da variação de velocidade foram verificados nos *folds*, onde algumas das linhas, que apresentavam grandes variações do *TR\_FOLD*, chegaram a atingir valores próximos do dobro do previsto. Além da variação na velocidade durante a

aquisição, a imobilização total do navio (por vezes encalhado) em zonas de pesquisa menos profundas foi também responsável por esta variação no *TR\_FOLD*.

Para além do pobre direccionamento do navio, a má distribuição dos pesos ao longo do *streamer* e a existência de correntes laterais dificultou o reboque do equipamento, nomeadamente a profundidade de reboque, facto verificado pelas constantes variações significativas de profundidade do mesmo. Estas variações de profundidade do *streamer* são a principal causa dos *Burst noise* visíveis nos *trace gathers* e nos *shot gathers*, causadas pela ascensão do *streamer* à superfície do nível da água e consequente mudança de pressão, dando origem a um aumento momentâneo de energia (*spike*) nos sensores piezoeléctricos dos receptores.

Tanto o *Burst noise* como as variações da profundidade do *streamer* foram completamente atenuados com o processamento utilizado. O primeiro foi atenuado aplicando o somatório de todos traços correspondentes ao mesmo ponto reflector comum, através do método CMP/CDP (*CMP stacking*) e o segundo, as variações da profundidade do *streamer*, foram corrigidas através do método *UHRS Trim Statics* (ver Figura 56 e Figura 57).

A geometria adoptada tem assim grande influência no impacto que as condições de operação de aquisição têm nos dados de sísmica de reflexão multicanal e vice-versa, podendo amplificar ou atenuar este impacto.

No âmbito deste trabalho, a geometria inicial adoptada teve um efeito negativo na qualidade do sinal multicanal juntamente com as condições de operação. No primeiro dia de aquisição, a geometria utilizada não era a adequada para as características da zona de pesquisa porque:

- O *offset* mínimo foi de aproximadamente 5 metros, duas vezes superior à profundidade mínima na zona de pesquisa;
- O *offset* máximo foi de aproximadamente 48 metros, 5 vezes superior à profundidade máxima na zona de pesquisa;
- A profundidade de reboque do *streamer* foi de 0.7 metros abaixo do nível médio do mar, em vez de 0.3 metros.

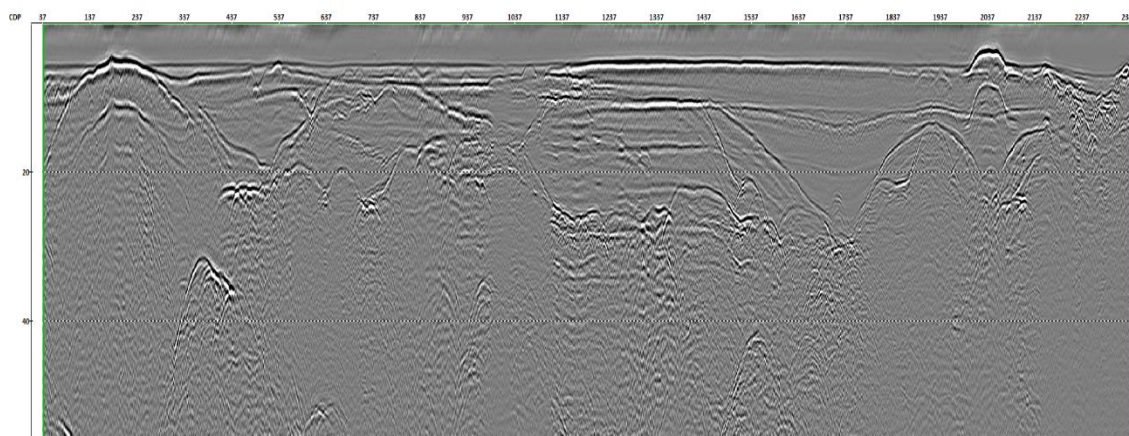
A geometria não foi a adequada porque com um *offset* mínimo demasiado longo em zonas de transição ou águas pouco profundas e tendo em conta a profundidade de reboque do equipamento (Ver 4.4.2.4), as reflexões primárias e os seus múltiplos chegam praticamente ao mesmo tempo aos receptores, verificando-se um atraso entre eles demasiado pequeno para os distinguir. Devido a esta quase inexistência de atraso entre múltiplo e reflexão primária não existe uma interferência construtiva do sinal e do *ghost*, dando origem a um sinal duplicado (*ghost* do *streamer*) (Figura 43). Reunidas estas “condições”, os dados registam algumas perdas de qualidade de sinal de eventos que ocorrem a baixas profundidades.

Devido a um *offset* máximo demasiado largo, houve igualmente perdas de qualidade de sinal de eventos que ocorrem a baixas profundidades devido às diferenças de NMO, que tornam difícil a distinção de reflexões primárias dos múltiplos e outros ruídos coerentes. Estas perdas de sinal são verificadas durante o processamento no passo 7 (Figura 50 e Tabela 3), quando é feita a correcção de NMO; na opção *Mute Stretch Threshold* atribui-se o valor 100 %, quando em condições normais não deve ser superior a 50 %. No âmbito deste trabalho, existiram linhas onde se aplicaram valores superiores a 100%. Como este passo envolve “esticar” a *wavelet* (aumenta o

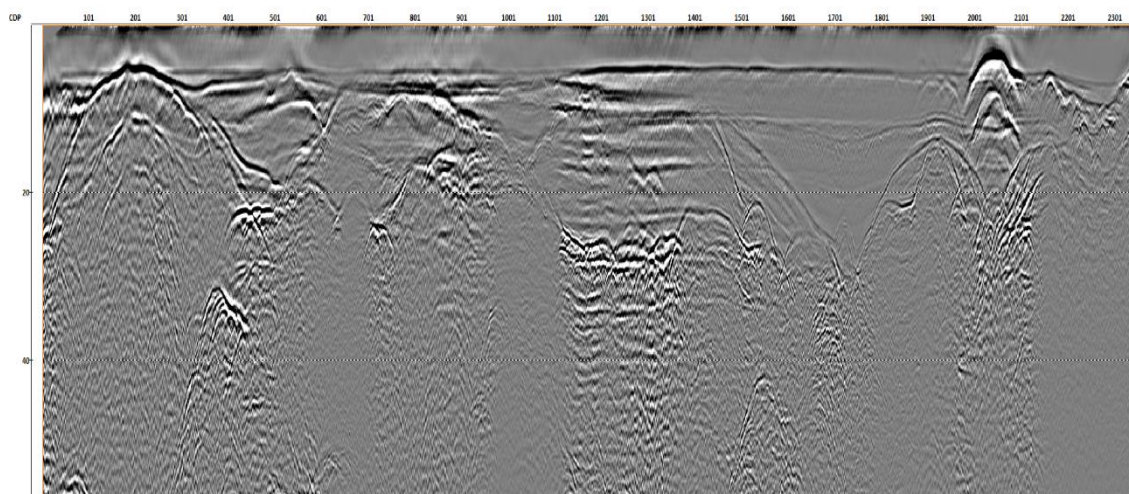


período), então quanto maior for o valor do *Mute Stretch Threshold* maior será o período. Os canais mais distantes apresentam períodos demasiado grandes em relação aos canais mais próximos da fonte, porque foram sujeitos a maiores correcções de NMO; portanto, ao somar todos os canais (*Stacking*) perde-se informação de eventos superficiais.

Observando as duas figuras, verifica-se que na Figura 70 a apesar do valor do *Mute Stretch Threshold* ser o mesmo em relação a Figura 70 b, nos canais mais próximos da fonte (Figura 70 a) o efeito da correcção do NMO é menor e tem uma resolução vertical superior em relação aos canais mais distantes (Figura 70 b), onde se pode ver a distorção do sinal e degradação de estruturas que ocorrem a superfície.



(a)



(b)

Figura 70 - Linha 037\_XLine1 com igual *Mute Stretch Threshold*; (a) do canal 1 ao canal 12; (b) do canal 1 ao canal 48. Escala vertical em TWT (milissegundos).

A redução do número de canais ou *offset* máximo para metade seria o ideal para a aquisição de dados sísmicos em água com esta profundidade, mantendo o *offset* mínimo e a profundidade de reboque do equipamento igual ao da geometria do segundo dia de aquisição. Entretanto, o comprimento do *streamer* não é factor decisivo para a qualidade dos dados, uma

vez que se pode seleccionar a informação que se pretende, mas influencia a manobrabilidade do navio.

Corrigida a geometria para os restantes dias de aquisição, minimizaram-se os efeitos negativos da geometria no impacto das condições de operação de aquisição, passando a existir apenas uma condicionante as condições de aquisição, a profundidade da zona de pesquisa que condiciona a mobilidade do navio, contra a qual nada se pode fazer.

Com a nova geometria, mais adequada a profundidade da zona pesquisa, a profundidade de reboque do *streamer* e o offset adoptado permitiu que houvesse um atraso das reflexões múltiplas em relação às reflexões primárias, gerando uma interferência construtiva entre ambos, como se pode verificar na análise espectral nos diferentes canais com a redução do *notch* nos espectros de frequências (ver Figura 42).

Em zonas de muito baixa profundidade, próximo dos dois metros, apesar de o *offset* mínimo ter sido reduzido e a profundidade de reboque do equipamento (fonte e receptor) ter sido colocada ao mesmo nível (0.3 metros), verificam-se fortes reverberações originadas pelas reflexões múltiplas do fundo do mar, não deixando ver qualquer estrutura geológicas nestas zonas (Figura 71). Estes múltiplos devem-se ao facto de a fonte e o receptor estarem demasiado próximos do fundo do mar, pelo que a energia proveniente da fonte é reflectida com a mesma intensidade pelo fundo do mar e devido ao forte coeficiente de reflexão na zona de interface entre o ar e a água esta energia é novamente reflectida; um processo que se repete sucessivamente, gerando reflexões múltiplas.

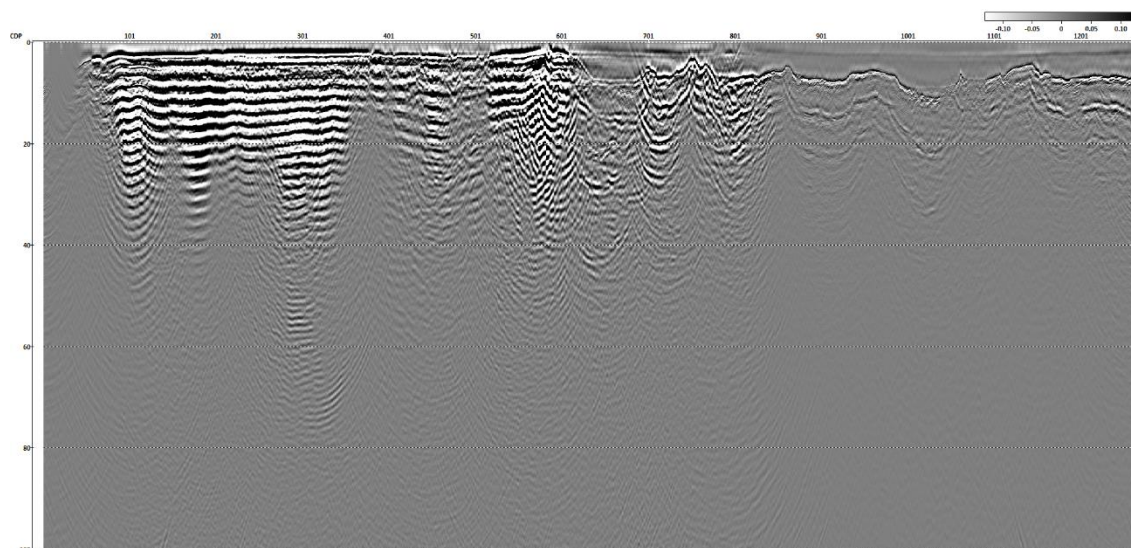


Figura 71 - Linha 039\_XLine4\_bis migrada, onde se podem ver as reverberações no lado esquerdo da secção sísmica e estruturas geológicas no lado direito da secção sísmica. Escala vertical em TWT (milissegundos).

Apesar das limitações da aquisição, foi possível obter informação muito útil a partir de aproximadamente metade dos dados processados no âmbito deste trabalho, sendo as linhas 037\_XLine1, 027\_Line3 e 032\_Line7 as linhas que apresentam uma melhor relação sinal/ruído e onde foi possível fazer o trabalho de interpretação e distinção de unidades sismo-estratigráficas (ver Anexo 4).

Uma forma de tentar evitar que as condições de operação tenham impacto negativo relevante na aquisição de dados sísmicos neste tipo de aquisição, zonas de transição ou águas

pouco profundas, poderia ser a utilização de receptores directamente posicionados no fundo do mar e efectuar disparos em posições diferentes, evitando-se a dificuldade de manobra do navio, dificuldades de reboque do equipamento, e variações de velocidade, entre outras condicionantes.

Apesar da pouca qualidade, estes dados permitiram fazer a identificação e interpretação das principais unidades sismo-estratigráficas: foi ainda possível neste trabalho fazer uma análise detalhada de muitos dos aspectos envolvidos na parametrização das campanhas de aquisição de dados, e saber de que forma as opções tomadas poderão influenciar o resultado final de uma determinada campanha de aquisição de sísmica de reflexão multicanal.

## 7. Conclusões

Além de se ter adquirido experiência profissional e familiarização com os métodos de funcionamento de uma empresa de geofísica, um dos objectivos principais deste estágio, conseguiram-se atingir os objectivos propostos com a aquisição de conhecimento sobre técnicas de processamento tanto a nível teórico como prático, até há pouco tempo desconhecidas.

Actualmente a sísmica de reflexão de alta resolução representa um método muito eficiente quando se tratam de estudos sobre a constituição do subsolo a baixas profundidades. Para isso, um processamento de dados de sísmica multicanal detalhado é necessário para melhorar a resolução das secções sísmicas, de forma a aumentar significativamente a sua qualidade.

No âmbito deste trabalho, foi possível processar dados de sísmica de muito alta resolução para a interpretação de camadas geológicas e qualquer outra estrutura geológica até 30 metros de profundidade abaixo do fundo do mar ou do maciço rochoso, com resolução vertical de 50 cm ou melhor nos primeiros 5 metros de profundidade. Foram processados 18 perfis sísmicos no total, fazendo ao todo um comprimento de 13.5 km e cobertura de uma área de aproximadamente 3.3 km<sup>2</sup>.

O processamento teve como foco melhorar a resolução da secção sísmica e a qualidade do sinal em todas as linhas 30 metros abaixo do fundo do mar. Obtiveram-se os seguintes resultados:

- A atribuição da geometria e o controlo de qualidade mostram de uma forma geral um CDP *fold* nominal com uma média de *fold* de 48 em todas as linhas (Figura 51). Entretanto, em linhas com um direccionamento pobre o CDP *fold* máximo chega a atingir 90;
- Continuidade lateral melhorada (Figura 62 b);
- Recuperação de sinal em profundidade com sucesso variável devido as restrições geológicas;
- Atenuação dos múltiplos muito boa (Figura 62b);
- Amplitudes relativas preservadas com sucesso para a maioria das linhas.

Apesar do processamento realizado ter melhorado muito significativamente a qualidade do sinal, o que era um dos principais objectivos deste trabalho, a baixa qualidade de algumas linhas não permitiu a obtenção das secções desejadas nalguns casos.

Nas secções apresentadas, procedeu-se à interpretação distinguiram-se três horizontes principais, um para o fundo do mar e dois outros que representam zonas de interface entre camadas; através da interpretação das configurações internas dos reflectores conseguiram-se assim diferenciar três unidades sismo-estratigráficas principais, sendo a unidade 1 constituída por várias sub-unidades (ver 5.1).

Observando as secções sísmicas interpretadas vislumbram-se em praticamente todas as unidades estruturas de canais, originadas provavelmente devido ao transporte de depósitos fluviais. Observam-se estruturas complexas erodidas ainda na unidade 1, que tornam a sua interpretação difícil.

Como já foi referido no capítulo anterior, a execução de uma campanha de pesquisa em que os receptores estivessem colocados directamente sobre o fundo do mar e os tiros executados

em locais diferentes, seria uma forma ideal de evitar que a profundidade da zona de pesquisa tivesse o impacto negativo que teve nas condições de operação na aquisição dos dados de sísmica multicanal em estudo. Provavelmente faria com que o tempo de aquisição fosse superior, os custos mais elevados e a necessidade de contratar mão-de-obra complementar.



## Referências bibliográficas

Applied Acoustic Engineering Limited (2005). Fundamentals of High Resolution Seismic Surveying. *Great Yarmouth Norfolk NR31 0NF UK*, 16 pp.

Arulrajah A., Bo M. W. (2008). Characteristics of Singapore Marine Clay at Changi. *Geotech. Geol. Eng.*, 26:431–441.

Azevedo, L. (2009). Seismic Attributes in Hydrocarbon Reservoirs Characterization. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, apresentada à Universidade de Aveiro, Departamento de Geociências*, 165 pp.

Brown, G., Hawkesworth, C. and Wilson, R. C. (1992). Understanding the Earth. *Cambridge University Press, 1st Edition*, 538pp.

Dobrin, M. and Sarit, C. (1988). Introduction to Geophysical Prospecting. *McGraw-Hill, 4th Edition*, 867 pp.

Gadallah, M. R., and Fisher, R. (2009). Exploration Geophysics. *Springer Science & Business Media, Berlin*, 262 pp.

Geosurveys (2015) Soil Investigation Singapore UHRS Seismic Data Processing. *Document Technical report No REP43162-1*, 30 pp.

Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I. (2002). An Introduction to Geophysical Exploration. *Blackwell Science, 3<sup>rd</sup> Edition*, 256 pp.

Kearey, P., Klepeis, K. A. and Vine, F. J. (2009). Global Tectonics. *Wiley-Blackwell, 3<sup>rd</sup> Edition*, 482 pp.

Kruk, J., (2003). Reflection seismic I. *Lecture given in WS 2003/2004 Institut für Geophysik, ETH Zürich*, 90 pp.

Marsset, B., Menut, E., Ker, S. and Leon, E. P. (2014). Deep-towed High Resolution seismic imaging. *Deep Sea Research Part I, Oceanographic Research Papers*, 15 pp.

McQuillin, R., Bacon, M. and Barclay, W. (1984). An Introduction to Seismic Interpretation. *Graham d Trotman, 2<sup>nd</sup> Edition*, 287 pp.

Mitchum, R.M., Jr., Vail, P.R. and Thompson III, S. (1977a). Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 2: The Depositional Sequence as Basic Unit for Stratigraphic Analysis. *American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26*, 53-62.

Mitchum, R.M., Todd, R.G. and Sangree J.B. (1977b). Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphic Interpretation of Seismic Reflection Patterns in Depositional Sequences. *American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26*, 117-133.

Parkinson, R., (2001). High Resolution Site Surveys. *Spon Press-Taylor & Francis e-Library*, 1<sup>st</sup> Edition, London, 235 pp.

Reynolds, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. *Willey*, 796 pp.

Ribeiro, T. D. (2011). Multichannel Seismic Investigation of the Gran Burato area, of W Galicia. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, apresentada à Universidade de Aveiro, Departamento de Geociências*, 250 pp.

Robinson, E. A., Durrani, T. S. and Peardon, L. G. (1986). Geophysical Signal Processing. *Prentice-Hall*, 25 pp.

Selley, R.C., Cocks, L. R. and Plimer, I. R. (2005). Encyclopedia of Geology. *Elsevier, Academic Press*, 1<sup>st</sup> Edition, UK, 808 pp.

Sheriff, R. E. and Geldart, L. P. (1995). Exploration Seismology. *Cambridge University Press*, 2<sup>nd</sup> Edition, Cambridge, 592 pp.

Sheriff, R. E. (1996). Understanding the Fresnel zone. *AAPG Explorer*, 18-19.

Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E. (1990). Applied Geophysics. *Cambridge University Press*, 2<sup>nd</sup> Edition.

Yilmaz, O. (2001). Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data. *Society of Exploration Geophysicists, Tulsa (OK)*, 1 Vol, 1000 pp.

Zhou, Y. and Cai, J. (2011). Rock cavern space development in Singapore. *Society for Rock Mechanics and Engineering Geology, Singapore In Proceedings of the Joint HKIE-HKIP Conference on Planning and Development of Underground Space*, 23, 24 September 2011, Hong Kong, 11-18.

Sites

[www.glossary.oilfield.slb.com/](http://www.glossary.oilfield.slb.com/)

[www.geosurveys.pt](http://www.geosurveys.pt)

## **Anexos**

## Anexo 1

### Log do processador

[illegible]

## Anexo 2

### Determinação dos *offsets* através da medição do tempo de chegada das ondas directas (*Direct Arrival*)

Line Name: 026					Line Name: 027					Line Name: 029					Line Name: 031				
X off	0,2	Velocity	1,53		X off	2	Velocity	1,53		X off	1,8	Velocity	1,53		X off	0,3	Velocity	1,53	
Y off	5,3				Y off	4,4				Y off	4,7				Y off	0,2			
g Int	1				g Int	1				g Int	1				g Int	1			
CHN	Direct Arrival				CHN	Direct Arrival				CHN	Direct Arrival				CHN	Direct Arrival			
1	5,30	3,5	5,36	-0,05	1	4,83	3,1	4,74	0,09	1	5,03	3,1	4,74	0,29	1	0,36	0,5	0,77	-0,40
2	6,30	4	6,12	0,18	2	5,76	3,8	5,81	-0,06	2	5,98	3,8	5,81	0,16	2	1,24	0,8	1,22	0,01
3	7,30	4,7	7,19	0,11	3	6,71	4,4	6,73	-0,03	3	6,94	4,6	7,04	-0,10	3	2,22	1,3	1,99	0,23
4	8,30		0,00		4	7,67		0,00		4	7,91		0,00		4	3,21		0,00	
5	9,30		0,00		5	8,63		0,00		5	8,88		0,00		5	4,21		0,00	
6	10,30	6,7	10,25	0,05	6	9,61	6,4	9,79	-0,18	6	9,87	6,5	9,95	-0,08	6	5,21	3,3	5,05	0,16
7	11,30		0,00		7	10,59		0,00		7	10,85		0,00		7	6,21		0,00	
8	12,30		0,00		8	11,57		0,00		8	11,84		0,00		8	7,21		0,00	
9	13,30		0,00		9	12,56		0,00		9	12,83		0,00		9	8,21		0,00	
10	14,30		0,00		10	13,55		0,00		10	13,82		0,00		10	9,20		0,00	
11	15,30		0,00		11	14,54		0,00		11	14,81		0,00		11	10,20		0,00	
12	16,30	10,6	16,22	0,08	12	15,53	10,2	15,61	-0,08	12	15,80	10,4	15,91	-0,11	12	11,20	7,1	10,86	0,34
13	17,30		0,00		13	16,52		0,00		13	16,80		0,00		13	12,20		0,00	
14	18,30		0,00		14	17,51		0,00		14	17,79		0,00		14	13,20		0,00	
15	19,30		0,00		15	18,51		0,00		15	18,79		0,00		15	14,20		0,00	
16	20,30		0,00		16	19,50		0,00		16	19,78		0,00		16	15,20		0,00	
17	21,30		0,00		17	20,50		0,00		17	20,78		0,00		17	16,20		0,00	
18	22,30		0,00		18	21,49		0,00		18	21,77		0,00		18	17,20		0,00	
19	23,30		0,00		19	22,49		0,00		19	22,77		0,00		19	18,20		0,00	
20	24,30		0,00		20	23,49		0,00		20	23,77		0,00		20	19,20		0,00	
21	25,30		0,00		21	24,48		0,00		21	24,77		0,00		21	20,20		0,00	
22	26,30		0,00		22	25,48		0,00		22	25,76		0,00		22	21,20		0,00	
23	27,30		0,00		23	26,48		0,00		23	26,76		0,00		23	22,20		0,00	
24	28,30	18,7	28,61	-0,31	24	27,47	18	27,54	-0,07	24	27,76	18,4	28,15	-0,39	24	23,20	15	22,95	0,25
36	40,30	26,3	40,24	0,06	36	39,45	25,7	39,32	0,13	36	39,74	26	39,78	-0,04	36	35,20	22,7	34,73	0,47
48	52,30	33,7	51,56	0,74	48	51,44	33,5	51,26	0,18	48	51,73	34	52,02	-0,29	48	47,20	30,6	46,82	0,38

Line Name: 032					Line Name: 033					Line Name: 035					Line Name: 036				
X off	0,2	Velocity	1,53		X off	0,2	Velocity	1,53		X off	0,2	Velocity	1,53		X off	0,2	Velocity	1,53	
Y off	0,5				Y off	0,5				Y off	0,5				Y off	0,5			
g Int	1				g Int	1				g Int	1				g Int	1			
CHN		Direct Arrival			CHN		Direct Arrival			CHN		Direct Arrival			CHN		Direct Arrival		
1	0,54	0,5	0,77	-0,23	1	0,54	0,7	1,07	-0,53	1	0,54	0,4	0,61	-0,07	1	0,54	0,2	0,31	0,23
2	1,51	0,8	1,22	0,29	2	1,51	0,9	1,38	0,14	2	1,51	0,9	1,38	0,14	2	1,51	0,8	1,22	0,29
3	2,51	1,6	2,45	0,06	3	2,51	1,4	2,14	0,37	3	2,51	1,6	2,45	0,06	3	2,51	1,6	2,45	0,06
4	3,51		0,00		4	3,51		0,00		4	3,51		0,00		4	3,51		0,00	
5	4,50		0,00		5	4,50		0,00		5	4,50		0,00		5	4,50		0,00	
6	5,50	3,5	5,36	0,15	6	5,50	3,5	5,36	0,15	6	5,50	3,5	5,36	0,15	6	5,50	3,4	5,20	0,30
7	6,50		0,00		7	6,50		0,00		7	6,50		0,00		7	6,50		0,00	
8	7,50		0,00		8	7,50		0,00		8	7,50		0,00		8	7,50		0,00	
9	8,50		0,00		9	8,50		0,00		9	8,50		0,00		9	8,50		0,00	
10	9,50		0,00		10	9,50		0,00		10	9,50		0,00		10	9,50		0,00	
11	10,50		0,00		11	10,50		0,00		11	10,50		0,00		11	10,50		0,00	
12	11,50	7,4	11,32	0,18	12	11,50	7,3	11,17	0,33	12	11,50	7,4	11,32	0,18	12	11,50	7,3	11,17	0,33
13	12,50		0,00		13	12,50		0,00		13	12,50		0,00		13	12,50		0,00	
14	13,50		0,00		14	13,50		0,00		14	13,50		0,00		14	13,50		0,00	
15	14,50		0,00		15	14,50		0,00		15	14,50		0,00		15	14,50		0,00	
16	15,50		0,00		16	15,50		0,00		16	15,50		0,00		16	15,50		0,00	
17	16,50		0,00		17	16,50		0,00		17	16,50		0,00		17	16,50		0,00	
18	17,50		0,00		18	17,50		0,00		18	17,50		0,00		18	17,50		0,00	
19	18,50		0,00		19	18,50		0,00		19	18,50		0,00		19	18,50		0,00	
20	19,50		0,00		20	19,50		0,00		20	19,50		0,00		20	19,50		0,00	
21	20,50		0,00		21	20,50		0,00		21	20,50		0,00		21	20,50		0,00	
22	21,50		0,00		22	21,50		0,00		22	21,50		0,00		22	21,50		0,00	
23	22,50		0,00		23	22,50		0,00		23	22,50		0,00		23	22,50		0,00	
24	23,50	15,2	23,26	0,24	24	23,50	15,2	23,26	0,24	24	23,50	15,5	23,72	-0,21	24	23,50	15,2	23,26	0,24
36	35,50	23,1	35,34	0,16	36	35,50	23,1	35,34	0,16	36	35,50	23,2	35,50	0,00	36	35,50	23,1	35,34	0,16
48	47,50	31,2	47,74	-0,24	48	47,50	30,8	47,12	0,38	48	47,50	31	47,43	0,07	48	47,50	31,2	47,74	-0,24

Line Name: 037					Line Name: 038					Line Name: 039					Line Name: 040				
X off	0,6	Velocity	1,53		X off	0,2	Velocity	1,53		X off	0,2	Velocity	1,53		X off	0,2	Velocity	1,53	
Y off	0				Y off	0,5				Y off	0,5				Y off	0,4			
g Int	1				g Int	1				g Int	1				g Int	1			
CHN		Direct Arrival			CHN		Direct Arrival			CHN		Direct Arrival			CHN		Direct Arrival		
1	0,60	0,4	0,61	-0,01	1	0,54	0,3	0,46	0,08	1	0,54	0,4	0,61	-0,07	1	0,45	0,3	0,46	-0,01
2	1,17	0,9	1,38	-0,21	2	1,51	0,9	1,38	0,14	2	1,51	0,8	1,22	0,29	2	1,41	0,8	1,22	0,19
3	2,09	1,6	2,45	-0,36	3	2,51	1,6	2,45	0,06	3	2,51	1,5	2,30	0,21	3	2,41	1,4	2,14	0,27
4	3,06		0,00		4	3,51		0,00		4	3,51		0,00		4	3,41		0,00	
5	4,04		0,00		5	4,50		0,00		5	4,50		0,00		5	4,40		0,00	
6	5,04	3,4	5,20	-0,17	6	5,50	3,4	5,20	0,30	6	5,50	3,5	5,36	0,15	6	5,40	3,4	5,20	0,20
7	6,03		0,00		7	6,50		0,00		7	6,50		0,00		7	6,40		0,00	
8	7,03		0,00		8	7,50		0,00		8	7,50		0,00		8	7,40		0,00	
9	8,02		0,00		9	8,50		0,00		9	8,50		0,00		9	8,40		0,00	
10	9,02		0,00		10	9,50		0,00		10	9,50		0,00		10	9,40		0,00	
11	10,02		0,00		11	10,50		0,00		11	10,50		0,00		11	10,40		0,00	
12	11,02	6,3	9,64	1,38	12	11,50	7,3	11,17	0,33	12	11,50	7,1	10,86	0,64	12	11,40	7,3	11,17	0,23
13	12,01		0,00		13	12,50		0,00		13	12,50		0,00		13	12,40		0,00	
14	13,01		0,00		14	13,50		0,00		14	13,50		0,00		14	13,40		0,00	
15	14,01		0,00		15	14,50		0,00		15	14,50		0,00		15	14,40		0,00	
16	15,01		0,00		16	15,50		0,00		16	15,50		0,00		16	15,40		0,00	
17	16,01		0,00		17	16,50		0,00		17	16,50		0,00		17	16,40		0,00	
18	17,01		0,00		18	17,50		0,00		18	17,50		0,00		18	17,40		0,00	
19	18,01		0,00		19	18,50		0,00		19	18,50		0,00		19	18,40		0,00	
20	19,01		0,00		20	19,50		0,00		20	19,50		0,00		20	19,40		0,00	
21	20,01		0,00		21	20,50		0,00		21	20,50		0,00		21	20,40		0,00	
22	21,01		0,00		22	21,50		0,00		22	21,50		0,00		22	21,40		0,00	
23	22,01		0,00		23	22,50		0,00		23	22,50		0,00		23	22,40		0,00	
24	23,01	15	22,95	0,06	24	23,50	15,3	23,41	0,09	24	23,50	15,2	23,26	0,24	24	23,40	15,2	23,26	0,14
36	35,01		0,00		36	35,50	23,1	35,34	0,16	36	35,50	23,2	35,50	0,00	36	35,40	23,2	35,50	-0,10
48	47,00	30,6	46,82	0,19	48	47,50	31,2	47,74	-0,24	48	47,50	31,3	47,89	-0,39	48	47,40	31	47,43	-0,03

Line Name: 041					Line Name: 044					Line Name: 046					Line Name: 047				
X off	0,2	Velocity	1,53		X off	0,2	Velocity	1,53		X off	0,1	Velocity	1,53		X off	0,1	Velocity	1,53	
Y off	0,3				Y off	0,3				Y off	0,2				Y off	0,3			
g Int	1				g Int	1				g Int	1				g Int	1			
CHN	Direct Arrival				CHN	Direct Arrival				CHN	Direct Arrival				CHN	Direct Arrival			
1	0,36	0,2	0,31	0,05	1	0,36	0,4	0,61	-0,25	1	0,22	0,2	0,31	-0,08	1	0,32	0,2	0,31	0,01
2	1,32	0,7	1,07	0,24	2	1,32	0,9	1,38	-0,06	2	1,20	0,6	0,92	0,29	2	1,30	0,6	0,92	0,39
3	2,31	1,4	2,14	0,17	3	2,31	1,2	1,84	0,47	3	2,20	1,3	1,99	0,21	3	2,30	1,2	1,84	0,47
4	3,31		0,00		4	3,31		0,00		4	3,20		0,00		4	3,30		0,00	
5	4,30		0,00		5	4,30		0,00		5	4,20		0,00		5	4,30		0,00	
6	5,30	3,4	5,20	0,10	6	5,30	3,3	5,05	0,25	6	5,20	3,1	4,74	0,46	6	5,30	3,2	4,90	0,40
7	6,30		0,00		7	6,30		0,00		7	6,20		0,00		7	6,30		0,00	
8	7,30		0,00		8	7,30		0,00		8	7,20		0,00		8	7,30		0,00	
9	8,30		0,00		9	8,30		0,00		9	8,20		0,00		9	8,30		0,00	
10	9,30		0,00		10	9,30		0,00		10	9,20		0,00		10	9,30		0,00	
11	10,30		0,00		11	10,30		0,00		11	10,20		0,00		11	10,30		0,00	
12	11,30	7,3	11,17	0,13	12	11,30	7,3	11,17	0,13	12	11,20	7,1	10,86	0,34	12	11,30	7,2	11,02	0,28
13	12,30		0,00		13	12,30		0,00		13	12,20		0,00		13	12,30		0,00	
14	13,30		0,00		14	13,30		0,00		14	13,20		0,00		14	13,30		0,00	
15	14,30		0,00		15	14,30		0,00		15	14,20		0,00		15	14,30		0,00	
16	15,30		0,00		16	15,30		0,00		16	15,20		0,00		16	15,30		0,00	
17	16,30		0,00		17	16,30		0,00		17	16,20		0,00		17	16,30		0,00	
18	17,30		0,00		18	17,30		0,00		18	17,20		0,00		18	17,30		0,00	
19	18,30		0,00		19	18,30		0,00		19	18,20		0,00		19	18,30		0,00	
20	19,30		0,00		20	19,30		0,00		20	19,20		0,00		20	19,30		0,00	
21	20,30		0,00		21	20,30		0,00		21	20,20		0,00		21	20,30		0,00	
22	21,30		0,00		22	21,30		0,00		22	21,20		0,00		22	21,30		0,00	
23	22,30		0,00		23	22,30		0,00		23	22,20		0,00		23	22,30		0,00	
24	23,30	15,3	23,41	-0,11	24	23,30	15,1	23,10	0,20	24	23,20	14,8	22,64	0,56	24	23,30	15	22,95	0,35
36	35,30	23,1	35,34	-0,04	36	35,30	22,9	35,04	0,26	36	35,20	22,7	34,73	0,47	36	35,30	23,1	35,34	-0,04
48	47,30	31	47,43	-0,13	48	47,30	30,9	47,28	0,02	48	47,20	30,6	46,82	0,38	48	47,30	31	47,43	-0,13



Line Name: 048					Line Name: 049				
X off	0,1	Velocity	1,53		X off	0,2	Velocity	1,53	
Y off	0,4				Y off	0,4			
g Int	1				g Int	1			
CHN		Direct Arrival			CHN		Direct Arrival		
1	0,41	0,4	0,61	-0,20	1	0,45	0,4	0,61	-0,16
2	1,40	0,7	1,07	0,33	2	1,41	0,8	1,22	0,19
3	2,40	1,3	1,99	0,41	3	2,41	1,6	2,45	-0,04
4	3,40		0,00		4	3,41		0,00	
5	4,40		0,00		5	4,40		0,00	
6	5,40	3,2	4,90	0,50	6	5,40	3,4	5,20	0,20
7	6,40		0,00		7	6,40		0,00	
8	7,40		0,00		8	7,40		0,00	
9	8,40		0,00		9	8,40		0,00	
10	9,40		0,00		10	9,40		0,00	
11	10,40		0,00		11	10,40		0,00	
12	11,40	7,1	10,86	0,54	12	11,40	7,4	11,32	0,08
13	12,40		0,00		13	12,40		0,00	
14	13,40		0,00		14	13,40		0,00	
15	14,40		0,00		15	14,40		0,00	
16	15,40		0,00		16	15,40		0,00	
17	16,40		0,00		17	16,40		0,00	
18	17,40		0,00		18	17,40		0,00	
19	18,40		0,00		19	18,40		0,00	
20	19,40		0,00		20	19,40		0,00	
21	20,40		0,00		21	20,40		0,00	
22	21,40		0,00		22	21,40		0,00	
23	22,40		0,00		23	22,40		0,00	
24	23,40	15	22,95	0,45	24	23,40	15,2	23,26	0,14
36	35,40	22,9	35,04	0,36	36	35,40	23,1	35,34	0,06
48	47,40	31	47,43	-0,03	48	47,40	31	47,43	-0,03

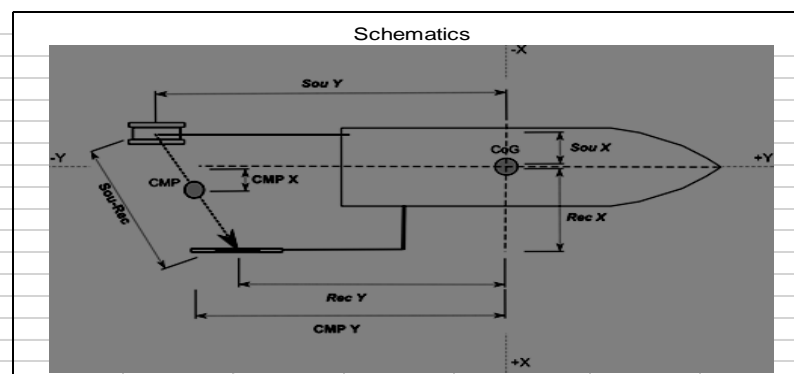
**Anexo 3**  
**Log do operador**

<b>Survey Summary</b>					
<b>Survey Location System</b>	Soil Investigation Singapore Singapore 1kJ + MC 48ch 1m	<b>Client Vessel Operators</b>	YJP Nivel LimOlivier Monrigal	<b>Start date End date</b>	10-12-14 14-12-14
<b>Site Name</b>					
<b>Size</b>					
<b>Water depth</b>	2-10 m				
<b>Geology</b>	Near shore – near channel filled with silt/sand for land extension – seabed cover with this material. Some rock				
<b>Terms of Reference</b>	Geophysical survey to image the seabed up to 30m down or to the rock stratum , with an accuracy Of 50cm for the first 5m.				
<b>Geodetic Information</b>	WGS 84 – NMEA sentences received				
<b>System</b>	1kJ LW + 48Ch streamer 1m				
<b>Power supply</b>	1 kJ PPS				
<b>Source</b>	200 tips sparker LW				
<b>Receivers</b>	Multichannel streamer 48ch 1m group spacing				
<b>Acquisition</b>	Multitrace 48				
<b>Positioning</b>	Trimble GPS+ DGPS no navigation software				
<b>Other towed/deployed equipment</b>					
Single channel 8E streamer as QC + echo-sounder					
<b>Main Issues</b>					
Physical fight between one of the crew and one of the surveyor from client company					
Streamer too deep for the 1 <sup>st</sup> day line → will be rerun if time/tide allow it					
Problem with outrigger, not possible to extend it more than 2m out of the vessel					
Because of low tide, SOL/EOL always streamer not in line the first day					
Urgency recovery when the vessel get stuck in a shallow sandbank = loss of floating anchor					

## Geometria de aquisição

### Source-Receiver Geometry

Survey Location System		Client Vessel Operator		Start date	
				End date	



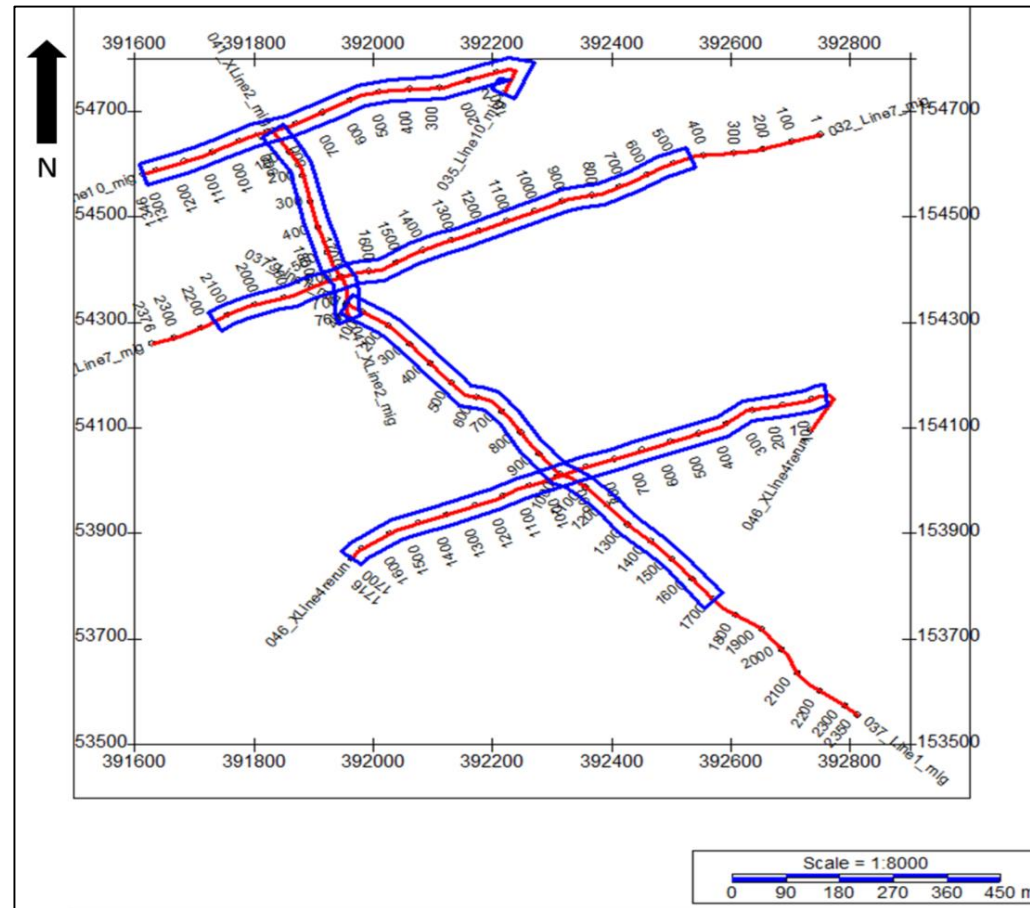
Measurement n.		First line		
Measurement date		Last line		
		Measurement n.		1
Estimated Depths (m)		Measured offsets (m)		Calculated offsets (m)
Source depth	0.3	Sou X	1,50	CMP X
Receiver depth	0.7	Sou Y	-27,00	CMP Y
		Rec X	3,50	Sou Rec
		Rec Y	-32,50	
		Channel n.		2
Estimated Depths (m)		Measured offsets (m)		Calculated offsets (m)
Source depth	0.3	Sou X	1,50	CMP X
Receiver depth	0.3	Sou Y	-32,50	CMP Y
		Rec X	3,50	Sou Rec
		Rec Y	-32,50	

## Aquisição de dados

Survey Location System							Client Vessel Operator						Start date	End date										
TYPE	Exec. Order	File Name	Date (dd-mm-yy)	SOL (Local) (hh:mm:ss)	EOL (Local) (hh:mm:ss)	Trigger interval (s)	Energy (J)	tip arrays	n.tips	Joules / tip	Input	Nº shots	length (ms)	Sample interval (Hz)	sample format	speed (knts)	COG	Wave height (m)	Depth Tie Eye	Geom	RT QC	NAV QC	-----Observations-----	
			12-12-14																0,3	1				
			12-12-14			400	300	2	200	1,5			200	10000					0,3	1				
Survey	00025	20141212_Line1	12-12-14		12:34:00 PM	400	300	2	200	1,5			200	10000		3,3	<0.3	0,3	1				Streamer not totally in line for SOL ( 30m off coast)	
Survey	00026	20141212_Line2	12-12-14	12:49:00 PM	12:59:00 PM	300	200	2	200	1			200	10000		2,7	<0.3	0,3	1				Streamer not totally in line for SOL ( 30m off coast)	
Survey	00027	20141212_Line3	12-12-14	01:02:00 PM	01:15:00 PM	300	200	2	200	1			200	10000		3,0	<0.3	0,3	1				Streamer not totally in line for SOL ( 30m off coast)	
Survey	00028	20141212_Line4	12-12-14	01:26:00 PM	01:37:00 PM	300	200	2	200	1			200	10000		2,8	<0.3	0,3	1				Streamer not totally in line for SOL ( 30m off coast)	
Survey	00029	20141212_Line5	12-12-14	01:48:00 PM	01:53:00 PM	300	200	2	200	1			200	10000		3,0	<0.3	0,3	1				short line between two island, seafloor cover withFine sand	
Rerun	00031	20141213_Line1_rerun	13/12/14			300	200	2	200	1			200	10000		2,8	<0.3	0,3	2				Straight on line	
Survey	00032	20141213_Line7	13/12/14			300	200	2	200	1			200	10000		3,3	<0.3	0,3	2				Straight on line	
Survey	00033	20141213_Line6	13/12/14			300	200	2	200	1			200	10000		3,3	<0.3	0,3	2				End of line stuck in sandbank	
Survey	00035	20141213_Line10	13/12/14			300	200	2	200	1			200	10000		3,3	<0.3	0,3	2				Beginning navigation sneaky	
Survey	00036	20141213_Line11	13/12/14			300	200	2	200	1			200	10000		3,2	<0.3	0,3	2				Shot 1900 island in the line	
Survey	00037	20141213_XLine1	13/12/14			300	200	2	200	1			200	10000		3,2	<0.3	0,3	2				Shot 600-700 island in the line ariation heading	
Survey	00038	20141213_XLine4	13/12/14			300	200	2	200	1			200	10000		3,2	<0.3	0,3	2				Shot 1900 island in the line variation heading	
Survey	00039	20141213_XLine4bis	13/12/14			300	200	2	200	1			200	10000		3,0	<0.3	0,3	2				Shot 700 variation heading/speed : tree in the line	
Survey	00040	20141213_XLine3	13/12/14			300	200	2	200	1			200	10000		3,2	<0.3	0,3	2					
Survey	00041	20141213_XLine2	13/12/14			300	200	2	200	1			200	10000		3,0	<0.3	0,3	2					
Survey	00044	20141214_XLine5	14/12/14	10:50:00 AM	11:01:00 AM	300	200	2	200	1			200	10000		3,1	<0.3	0,3	2				Line stopped when water too shallow	
Survey	00045	20141214_Line3_rerun	14/12/14	11:18:00 AM		300	200	2	200	1			200	10000		3,2	<0.3	0,3	2				Streamer not straight SOL + vessel blocked in Sandbank, urgency recovery	
Survey	00046	20141214_Line4_rerun	14/12/14	11:52:00 AM	12:00:00 PM	300	200	2	200	1			200	10000		3,2	<0.3	0,3	2					
Survey	00047	Line5_extend	14/12/14	12:21:00 PM	12:25:00 PM	300	200	2	200	1			200	10000		3,0	<0.3	0,3	2				Shot 770 buoy on the line + stuck in sand shortlyAfter : recovery	
Survey	00048	20141214_XLine6	14/12/14	01:16:00 PM		300	200	2	200	1			200	10000		3,0	<0.3	0,3	2				Stuck in sand ; recovery	
Survey	00048	20141214_Line9	14/12/14	02:03:00 PM	02:08:00 PM	300	200	2	200	1			200	10000		3,0	<0.3	0,3	2				EOL stuck in sand : recovery	

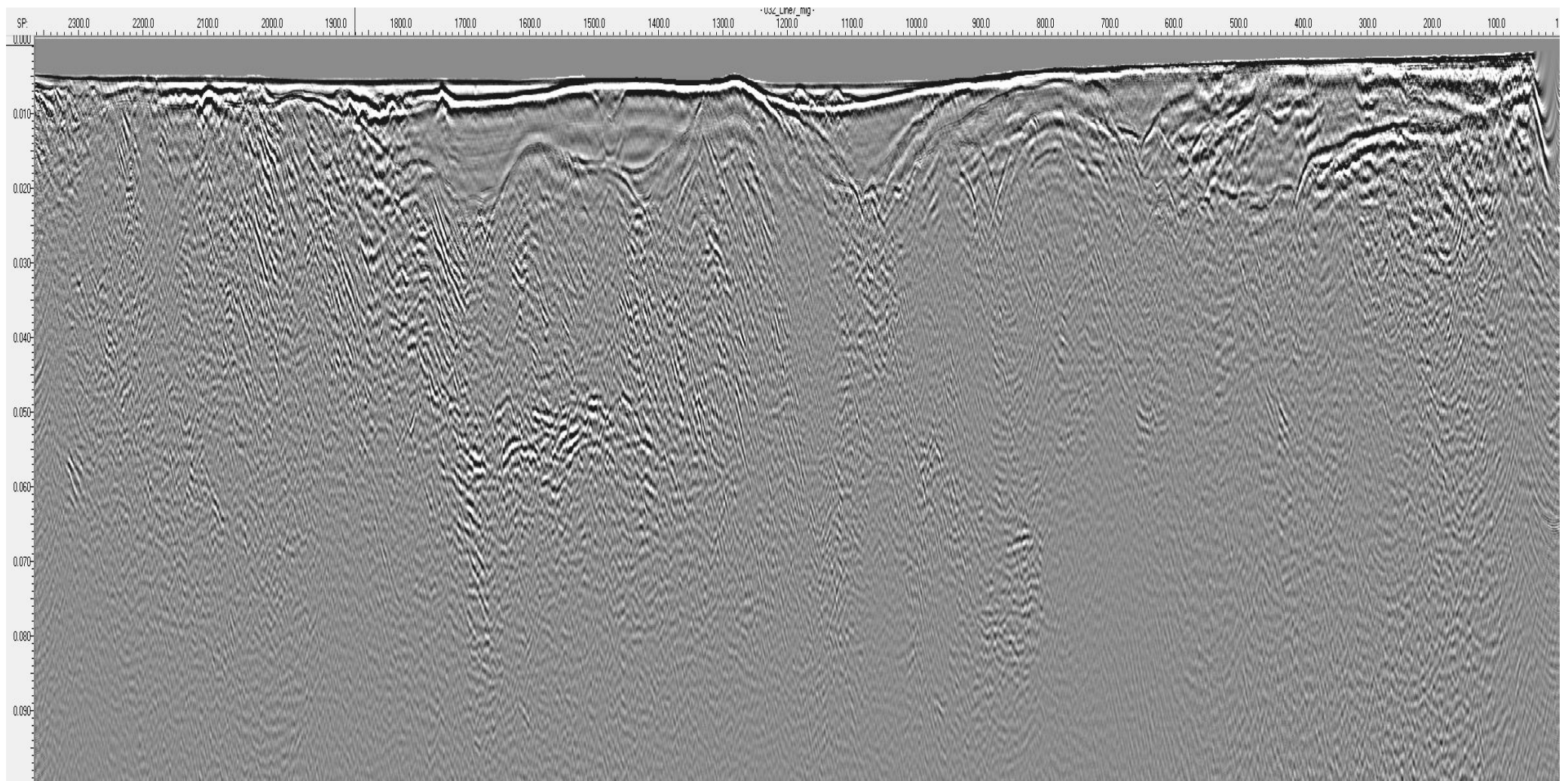
## Anexo 4

### Interpretação



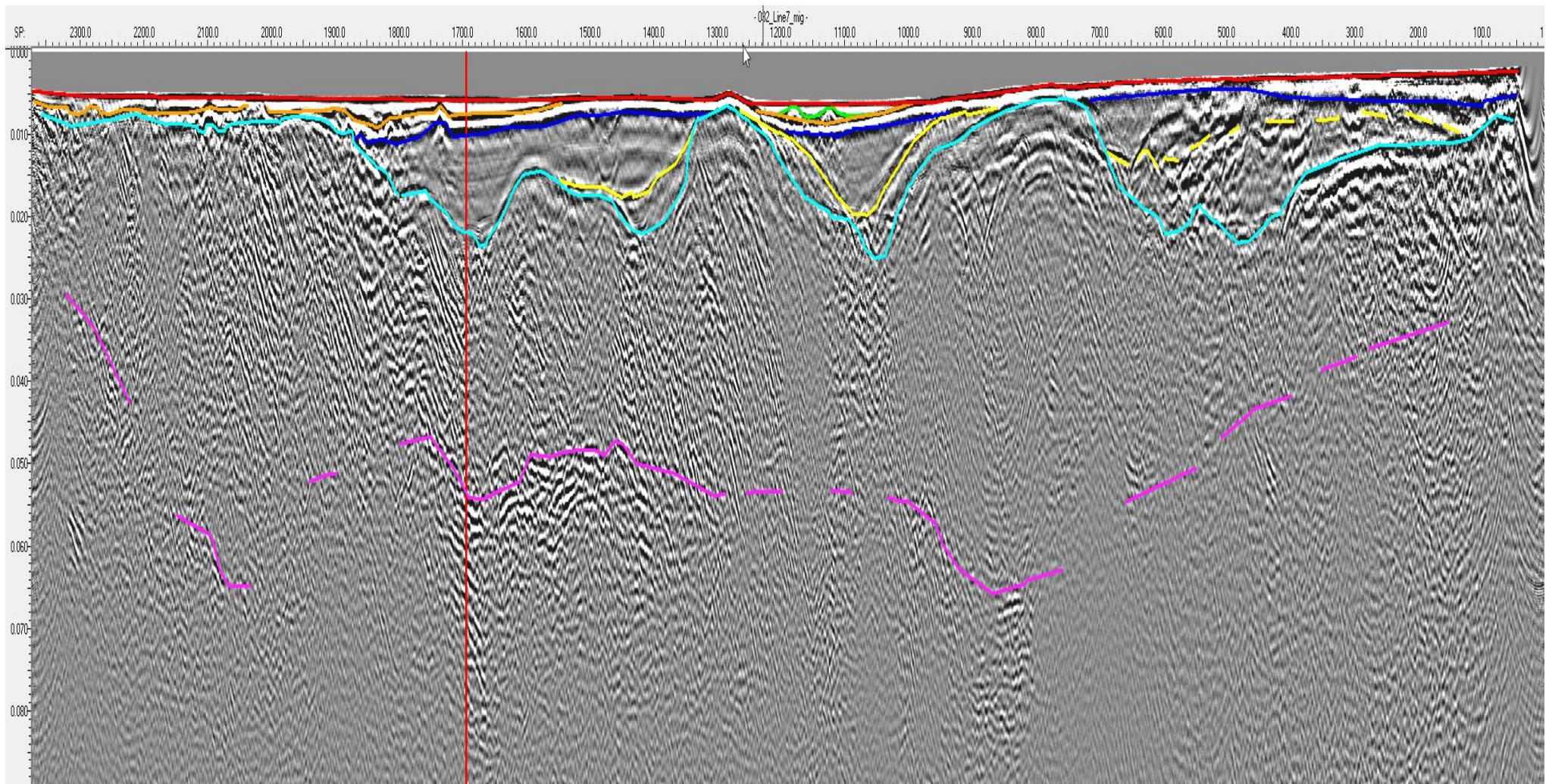
*Base map com as linhas interpretadas*

### 032\_Line7 – Antes da interpretação



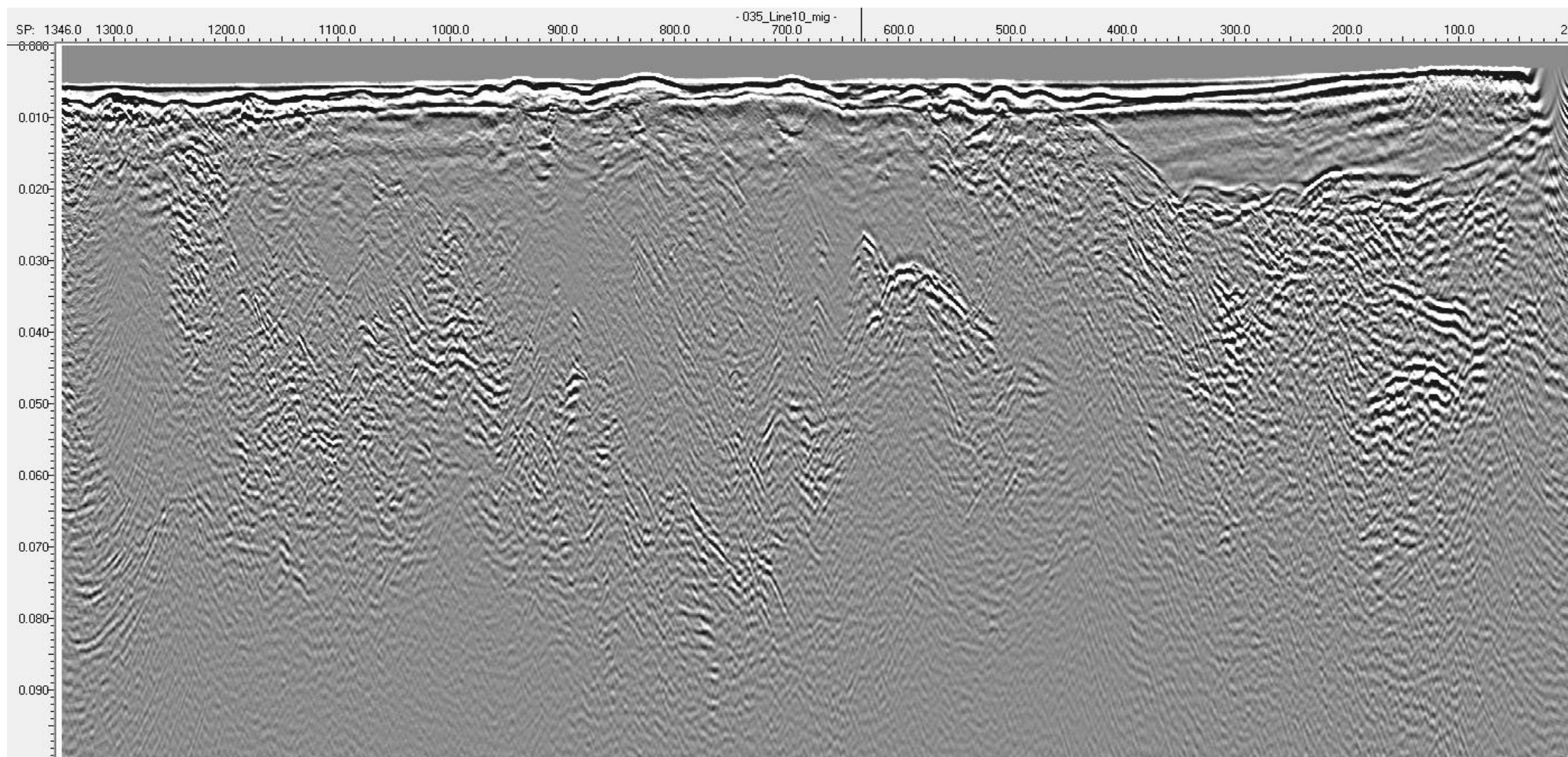


### 032\_Line7 – Depois da interpretação

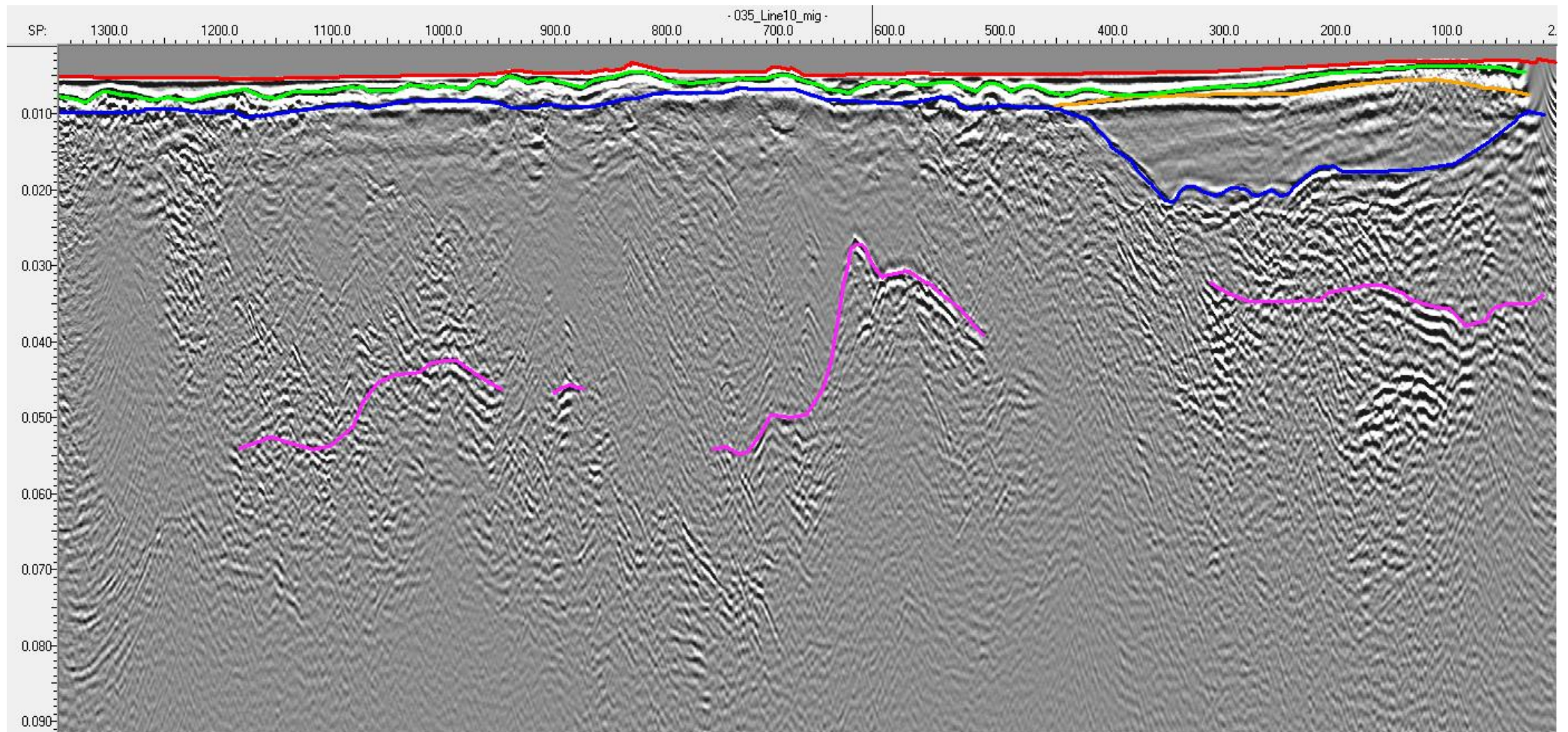




### 35\_Line10 – Antes da interpretação

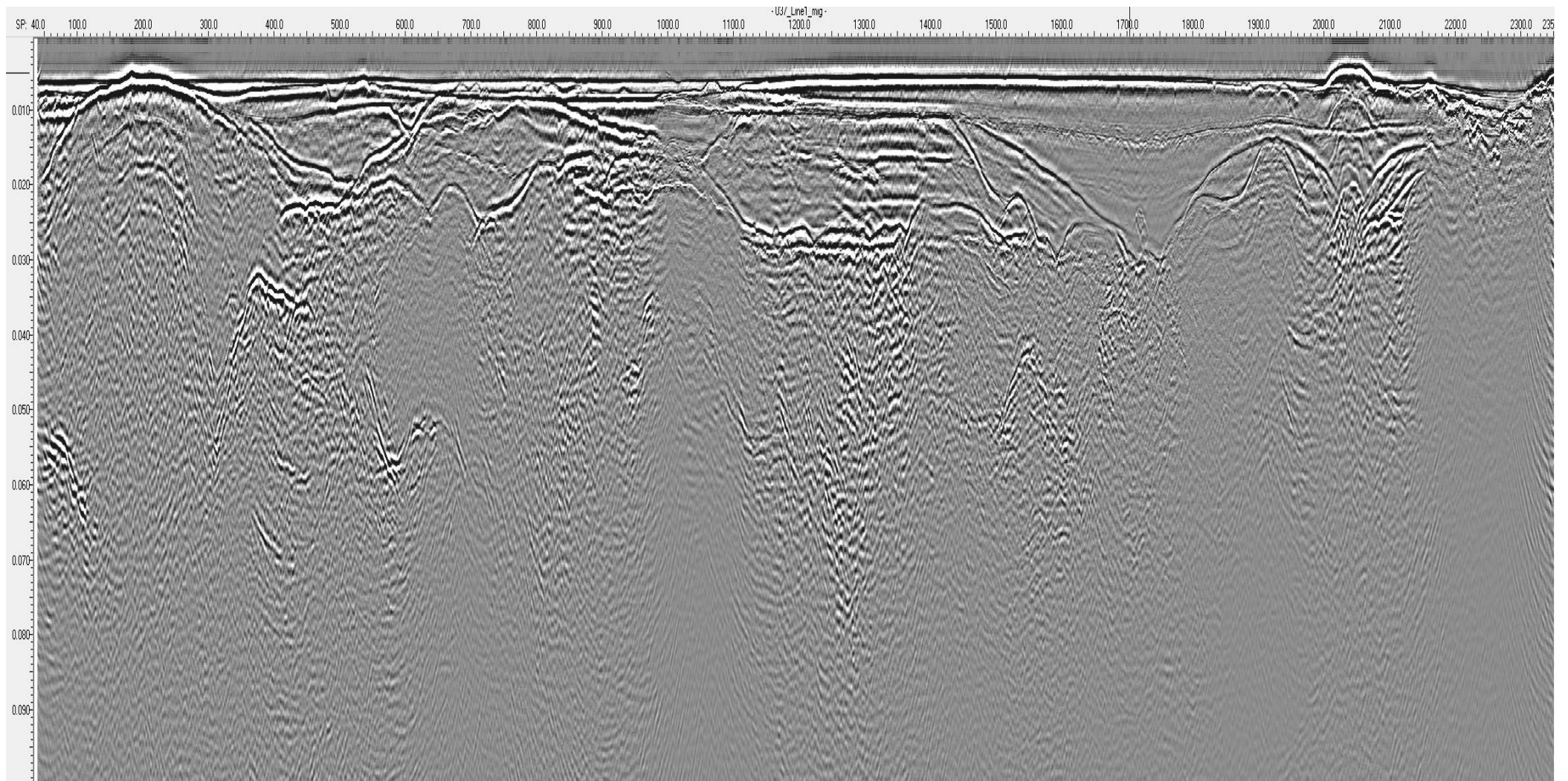


### 35\_Line10 – Depois da interpretação



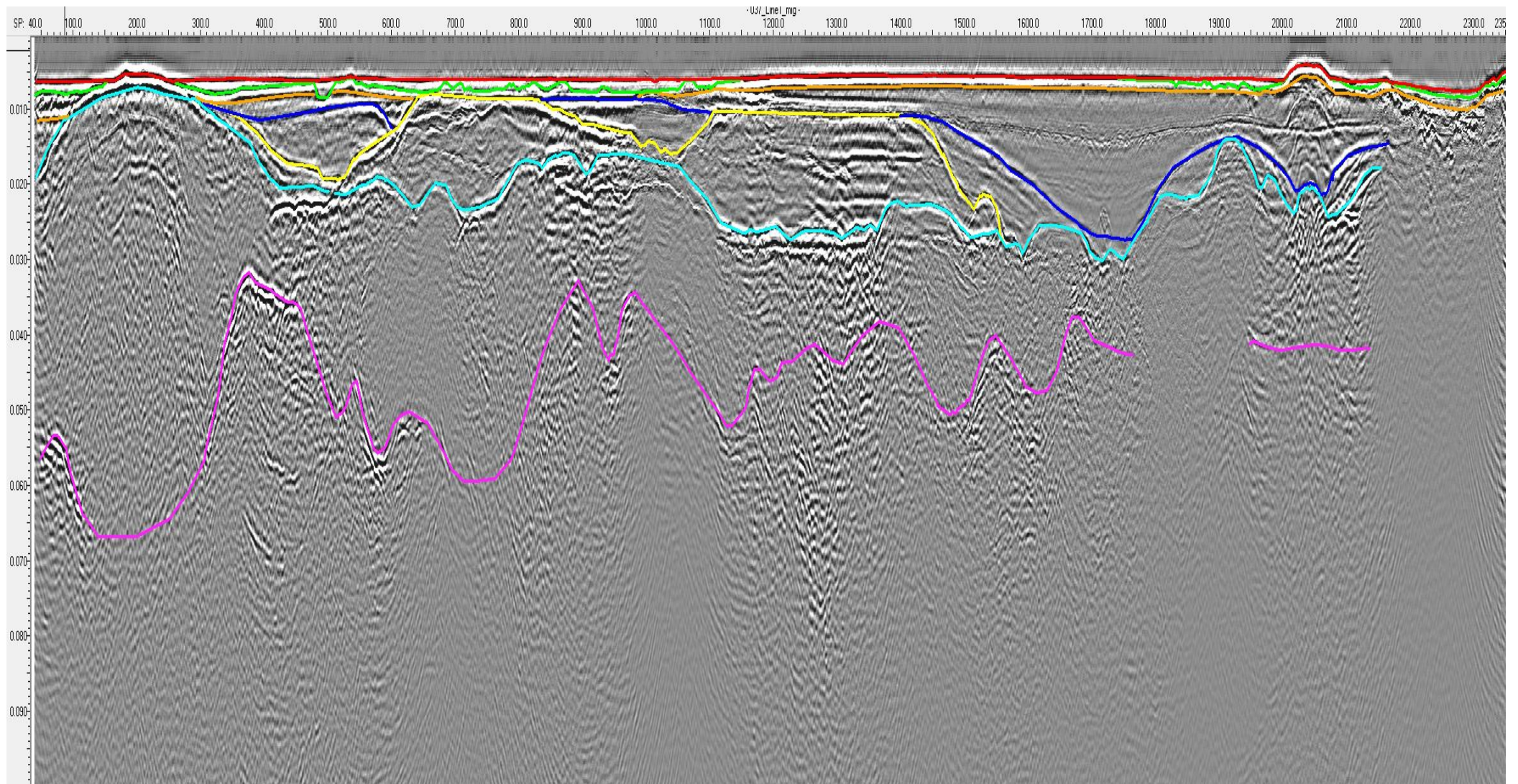


### 37\_XLine1 – Antes da interpretação

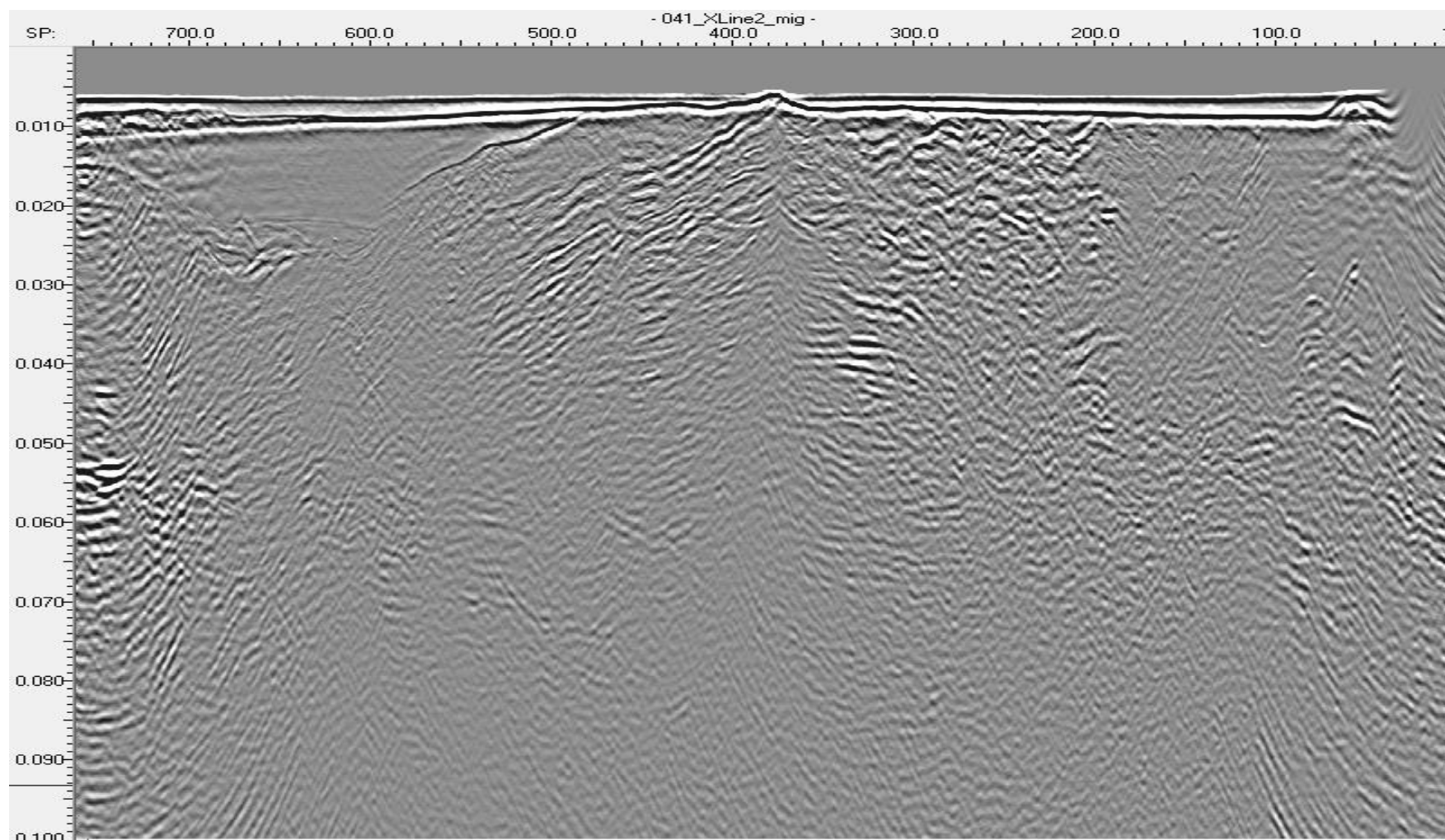




### 37\_XLine1 – Depois da interpretação

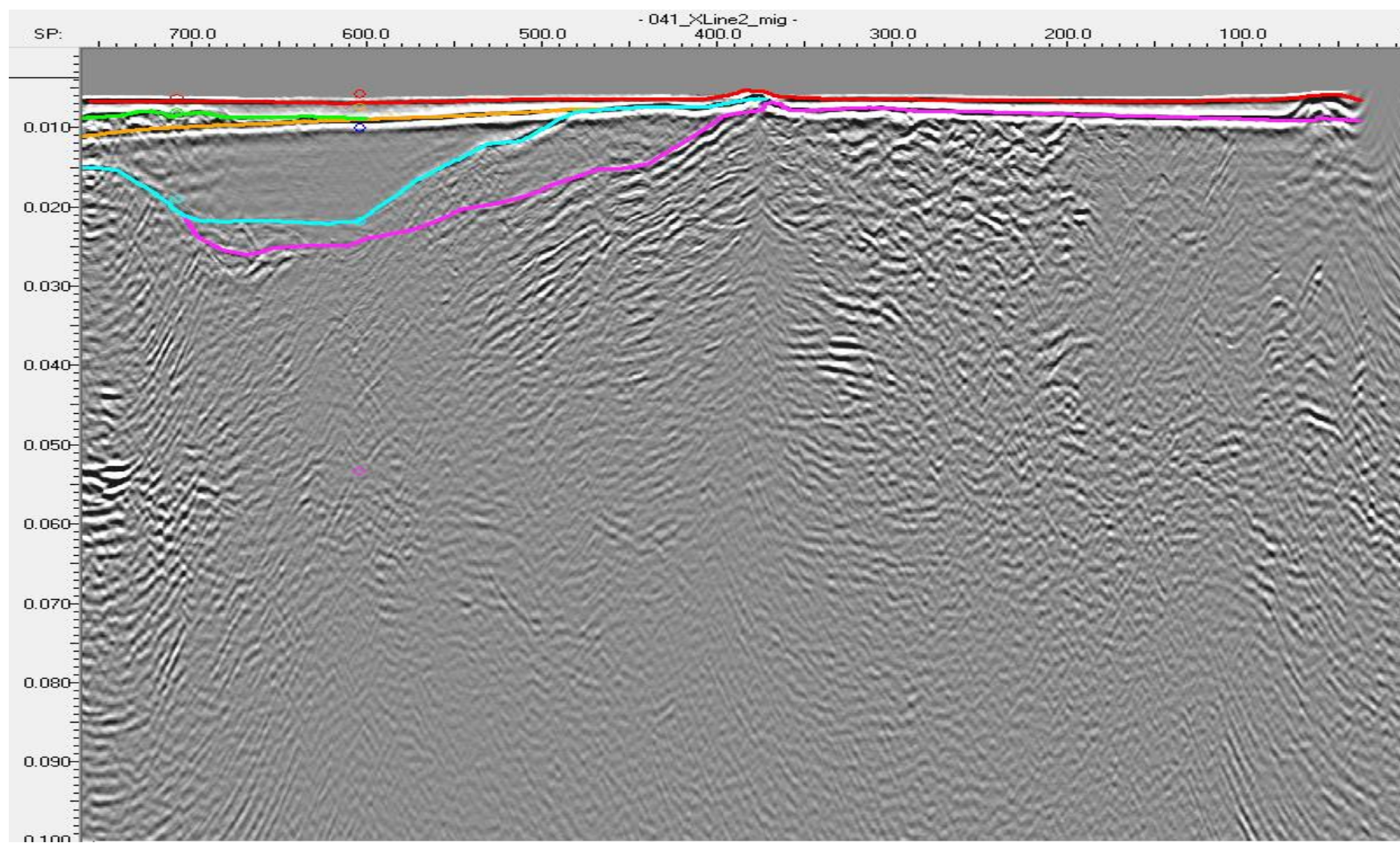


041\_Xline2 – Antes da interpretação



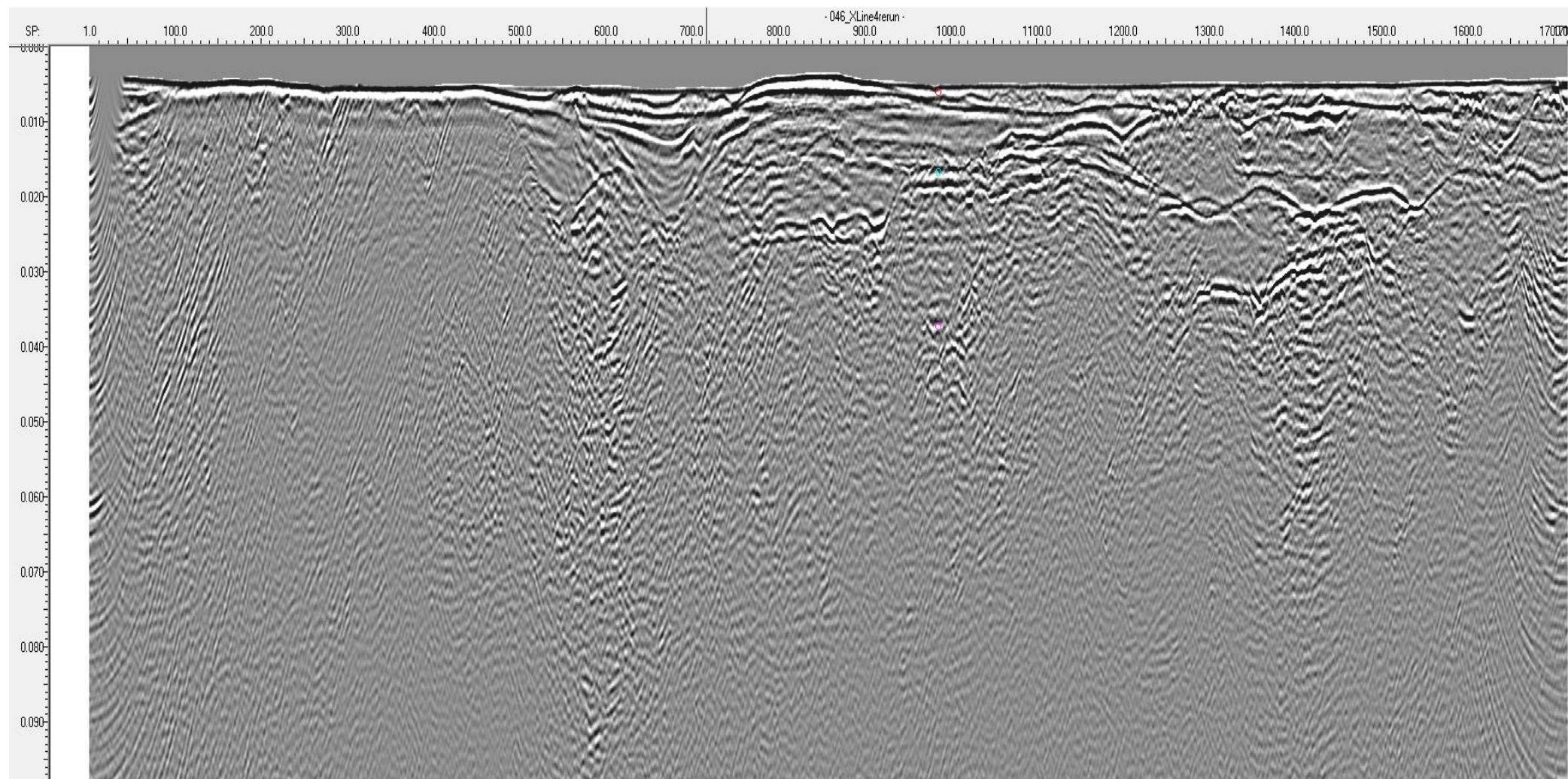


041\_Xline2 – Depois da interpretação





# 046\_Line4 – Antes da interpretação





### 046\_Line4 – Depois da interpretação

